Emissioni naturali di petrolio

Nel Golfo del Messico, regione famosa per i vasti campi di idrocarburi, gran parte del petrolio che si riversa in mare si infiltra naturalmente attraverso fessure del fondo

di Ian R. MacDonald

CHIAZZE DI PETROLIO

Le strie rettilinee che appaiono tra le ombre proiettate dalle nubi in questa fotografia aerea, rivelano chiazze di petrolio filtrato naturalmente nelle acque del Golfo del Messico attraverso sbocchi sul fondo marino.

Ralph Baker

Jonathan Blair *Crocodile Photos*

Quando una goccia di petrolio affiora in superficie, si espande rapidamente in uno strato sottilissimo, producendo un alone iridescente.

Al di sotto del Golfo del Messico, a sud di Texas e Louisiana, minuscole bolle di petrolio e gas naturale si fanno strada verso l'alto attraverso i sedimenti marini. In prossimità del fondo, questi idrocarburi devono superare ancora uno strato pullulante di esotiche forme di vita prima di trasudare nell'acqua marina. Essendo più leggere dell'acqua, queste bolle risalgono in sottili e sinuosi pennacchi, fino a raggiungere la superficie. Qui il gas si disperde nell'atmosfera, mentre il petrolio viene spinto alla deriva dal vento, evapora, si mescola con l'acqua e finisce col disperdersi del tutto.

La stagione migliore per assistere a un simile fenomeno è l'estate, quando capita spesso che sulle acque del Golfo regni calma piatta anche per diversi giorni di seguito. Alla metà del pomeriggio, quando avvampa il calore dei tropici, dal ponte di una nave si possono osservare ampi nastri di petrolio che si estendono fino all'orizzonte. Risalendo sopravvento lungo una di queste strisce, si potrà notare come il mare assuma un aspetto insolitamente levigato. L'acqua sembra farsi più vitrea, e il riverbero del sole più intenso. Pesci volanti balzano fuori e ricadono nell'acqua senza quasi far rumore. Nell'aria è diffuso un acre odore di petrolio, del tutto distinto da quello degli scarichi della nave, e sull'acqua si scorgono chiazze di aspetto ceroso che fluttuano o aderiscono allo scafo.

Improvvisamente, le goccioline oleose cominciano a formare cerchietti iridescenti che passano rapidamente dalle dimensioni di un sottobicchiere a quelle di un grosso piatto prima di scomparire, nel nitore cristallino dell'acqua, per continuare nel loro moto di deriva. Procedendo ancora sopravvento, il mare riacquista il suo aspetto normale. L'acqua si fa più scura, la brezza produce di nuovo lievissime increspature e i pesci volanti riprendono i tonfi consueti. La nave ha superato la chiazza di petrolio. Ma eccone in lontananza un'altra, e un'altra ancora. Ho udito raccontare da piloti della Guardia costiera come, prima di venire a conoscenza della vera origine del fenomeno, essi sprecassero ore e ore in vani tentativi di rintracciare i natanti responsabili di queste perdite.

In effetti, la perdita di idrocarburi dal fondo marino produce effetti visibili estremamente simili a quelli di un lavaggio abusivo di cisterne in mare. Ma, nonostante l'apparente somiglianza, il fenomeno è una conseguenza naturale delle condizioni geologiche che fanno del Golfo del Messico uno dei più grandi bacini petroliferi del mondo.

Il petrolio che trasuda dal fondo del Golfo del Messico, come quello di qualunque altra regione, si forma perché il calore interno della Terra «cuoce» costantemente i materiali organici racchiusi nella roccia sedimentaria. Col tempo, gli idrocarburi formatisi in questo modo risalgono dagli strati più profondi fino a rimanere imprigionati in arenarie porose, scisti fratturati o resti calcarei di antiche barriere coralline.

Oltre ad avere in abbondanza rocce madri e «trappole» geologiche per racchiudere il petrolio che migra, il Golfo del Messico è speciale per un altro motivo: in esso è presente un antico strato salino formato durante i ripetuti episodi di evaporazione che si verificarono nel Giurassico, circa 170 milioni di anni fa. Il sale cristallino è malleabile, ma relativamente incompressibile; nel corso dei tempi geologici, il peso dei sedimenti lo ha forzato a spostarsi verso l'alto e verso l'esterno, provocando la formazione di strutture dagli aspetti più disparati. Alcune di queste strutture restano in contatto con il letto originario; altre si muovono come corpi separati attraverso il sedimento circostante.

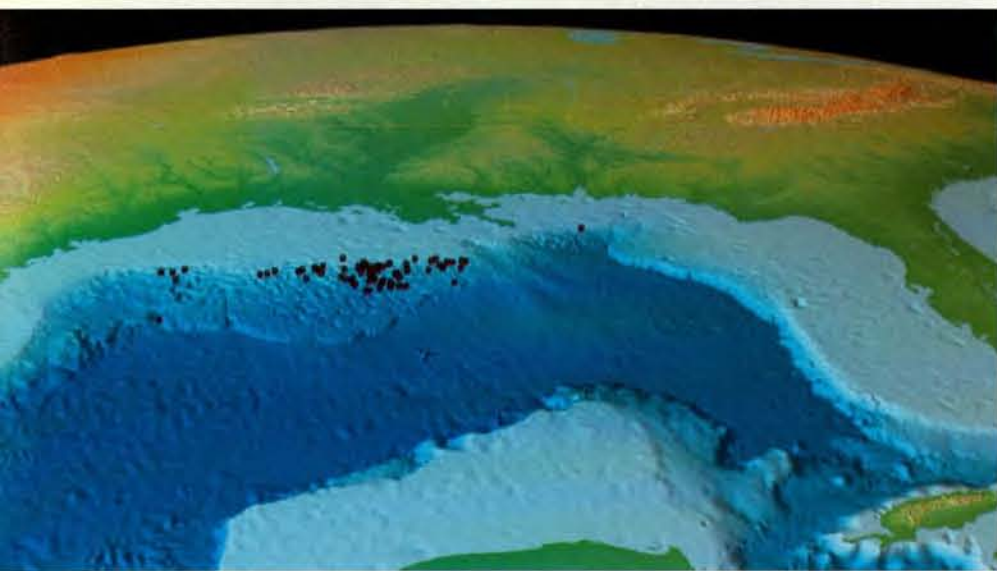
La tettonica del sale condiziona in vari modi la migrazione di idrocarburi. Per esempio, il sale è impermeabile e può efficacemente fungere da coperchio per intrappolare idrocarburi. Inoltre il suo movimento può aprire grandi faglie che si estendono dai giacimenti a grande profondità fino alla superficie, costituendo varchi attraverso i quali il petrolio può farsi strada verso l'alto.

La presenza di tali strutture rende il Golfo del Messico una regione dalle caratteristiche uniche che non a caso, nella storia dell'industria petrolifera, ha avuto un rilievo preponderante. La produzione «offshore» di petrolio e gas naturale fu inaugurata proprio nel Golfo, quando le prime piattaforme furono costruite a sud della Louisiana nel 1947. Negli anni successivi, le operazioni di trivellazione si spostarono a distanza crescente dalla riva via via che i progressi tecnici permettevano lo sfruttamento di giacimenti in fondali sempre più alti.

Le conseguenze sociali ed economiche di questa espansione sono state enormi. È oggi impossibile immaginare la costa del Golfo senza il caratteristico assembramento di personale dell'industria petrolifera, di aste di trivellazione, piattaforme, petroliere, oleodotti e raffinerie. A un livello che non trova eguali in altre parti del mondo, il Golfo del Messico è un luogo in cui si vive sul mare e si lavora al di sotto di esso per venire incontro all'insaziabile sete di petrolio della società industriale.

I riversamenti naturali di petrolio conferiscono un aspetto affascinante a questa impresa. Anche se la loro esistenza può risultare una novità per molti, questi fenomeni sono storicamente ben documentati. I manufatti precolom-

John De Santis

La compilazione di John C. Soley delle chiazze di petrolio osservate tra il 1902 e il 1909 (*pallini rossi nella cartina qui sopra*) mostra una preponderanza di avvistamenti a sud-ovest del delta del Mississippi. La posizione degli sbocchi degli idrocarburi sul fondo del Golfo del Messico è stata recentemente determinata impiegando metodi moderni (*qui sotto*) e induce a pensare che molte delle aperture attive all'inizio del secolo stiano emettendo idrocarburi ancora oggi.

William F. Haxby

biani di quella regione mostrano come le popolazioni tribali facessero normalmente uso di catrame raccolto sulle spiagge per calafatare le imbarcazioni, mentre i resoconti spagnoli in cui si accenna alla presenza di chiazze oleose sul mare risalgono al XVI secolo. Nel 1910 l'ufficiale di marina statunitense John C. Soley pubblicò il primo studio sistematico di tali chiazze proprio su «Scientific American».

Soley esaminò le notizie sugli avvistamenti di petrolio in mare contenute nei diari di bordo di molte navi. Un capitano, per esempio, riferiva di uno strato oleoso dello spessore di alcuni pollici e dell'estensione di diverse miglia. Un altro descriveva «fontane di petrolio che erompevano dalla superficie marina in tre fiotti separati, tra acque schiumanti». Questi resoconti furono scritti molti decenni prima che fossero costruite le prime piattaforme offshore, in un'epoca che precede anche l'uso generalizzato del petrolio come combustibile per la propulsione delle navi. L'origine di tutto quel petrolio doveva pertanto apparire assai enigmatica.

Le teorie elaborate da Soley per spiegare il fenomeno ci appaiono oggi molto ingenue, almeno nei loro dettagli. Per esempio, egli riteneva che il petrolio trovato al largo fosse in buona parte inorganico. Nondimeno, i dettagli riferiti da questi marinai rimasti anonimi - le chiazze fluttuanti di petrolio, gli uccelli marini impiastrati, le masse di catrame e l'acre fetore - evocano le ben note immagini dei disastri ecologici associati all'estrazione o al trasporto di greggio. E in effetti, queste descrizioni dei primi del secolo sono talmente drammatiche da indurre a chiedersi se l'entità dei riversamenti naturali di petrolio non fosse molto maggiore dell'attuale.

Dov'è la falla?

Soley dovette basarsi su descrizioni aneddotiche e mappe di navigazione imperfette per produrre una cartografia delle chiazze di petrolio. Probabilmente non poteva immaginare che, date le proprietà fisiche e chimiche del petrolio, un giorno si sarebbe potuto rilevarne gli spostamenti anche da grande distanza, monitorando così vaste aree.

Quando si dispone in chiazze più spesse di 4 micrometri - come accade in seguito a incidenti di navigazione - il greggio forma una copertura di colore variabile dal bruno rossiccio all'ambrato. Con l'esposizione al sole, la frazione volatile del petrolio evapora rapidamente, lasciando un residuo ceroso che produce un'emulsione schiumosa con l'acqua e tende a coagulare in appiccicosi ammassi di catrame di forma globulare. Se lo spessore delle chiazze è compreso tra 1 e 4 micrometri, lo strato oleoso rifrange la luce incidente così da formare aloni iridati come quelli che si vedono nelle pozzanghere a lato dei marciapiedi. Le chiazze di petrolio che si formano naturalmente possono avere uno spessore da 0,01 a 1 micrometro, pari cioè solo a poche decine di molecole. Nondimeno, i legami chimici degli idrocarburi sono sufficienti a conferire alla pellicola oleosa una straordinaria persistenza. Questo strato tensioattivo impedisce la formazione delle increspature che il vento produrrebbe altrimenti sulla superficie marina; ciò a sua volta permette all'acqua di riflettere la luce quasi come se fosse uno specchio.

Il contrasto tra la riflessione di un sottile staterello di petrolio e la normale dispersione della luce da parte dell'acqua di mare rende queste chiazze molto caratteristiche in certe condizioni. Con un'inclinazione favorevole dei raggi solari, le chiazze si possono agevolmente seguire da aeroplani e perfino da veicoli orbitanti.

Gli astronauti sulle navette spaziali, per esempio, possono avvistare facilmente le chiazze osservando lo scintillio dei raggi solari sulla superficie marina, e questo effetto ottico può rivelarsi assai utile per seguire l'andamento delle correnti oceaniche. Al centro di

Il riverbero dei raggi solari sulle acque del Golfo del Messico osservato dagli astronauti dello shuttle *Atlantis* evidenzia molte chiazze separate di petrolio (*fotografia a destra*). Presso il centro della zona luminosa, dove la riflessione dei raggi solari è più intensa, le chiazze sono particolarmente brillanti, mentre alla periferia della regione illuminata esse appaiono relativamente scure rispetto alle zone circostanti. La differenza deriva dal fatto che la superficie delle chiazze, come quella di uno specchio, riflette i raggi solari (*linee rosse nel grafico qui sotto*) verso l'occhio dell'osservatore nel primo caso, e lontano da esso nel secondo caso. Al tempo stesso, la superficie più irregolare dell'acqua priva di copertura oleosa, che tende a diffondere la luce incidente in entrambi i casi, appare più uniforme.

National Aeronautics and Space Administration

John De Santis

una zona illuminata obliquamente dai raggi del sole, il bagliore delle chiazze oleose è nettamente più intenso rispetto alla riflessione più diffusa delle acque non contaminate da petrolio. La situazione si inverte ai margini della scena, dove gli effetti di illuminazione tendono a far apparire le chiazze più scure rispetto alle acque circostanti.

Le chiazze risultano scure anche sotto «illuminazione» radar, dato che la posizione della sorgente del fascio radar coincide con quella del rivelatore, e il fascio incide di solito obliquamente. Con l'invio di dispositivi radar in orbita, come è avvenuto con lo European Radar Satellite, il canadese RADARSAT e i radar dello shuttle, si è acquisita la possibilità di rilevare la presenza di tracce di petrolio in qualunque punto dell'oceano. Talvolta si sfruttano le riflessioni radar delle chiazze naturali di petrolio per studiare la circolazione delle acque superficiali. I risultati che si ottengono in questo modo mostrano dettagli che sarebbe difficile distinguere con gli strumenti oceanografici convenzionali. E i geologi alla ricerca di segni rivelatori di giacimenti petroliferi nascosti possono pure trarre vantaggio dalle immagini ottenute dallo spazio.

Separare il grano dalla pula

Per usare il telerilevamento nello studio dei riversamenti naturali di petrolio occorre un modo per distinguere i sottili strati oleosi dal gran numero di chiazze di sostanze tensioattive, che nulla hanno a che fare con il petrolio. Le uova dei pesci, le paraffine prodotte dalle piante acquatiche e gli ammassi planctonici, tra gli altri fenomeni, producono tensioattivi che, quando sono concentrati dal gioco delle correnti, possono generare chiazze rilevabili. Ma i segni distintivi delle emissioni naturali di petrolio sono facilmente riconoscibili.

Normalmente, petrolio e gas fuoriescono dal fondo marino attraverso un gruppo di aperture spaziate di alcune centinaia di metri lungo un segmento di faglia. Pertanto, la sorgente si può considerare fissa. I modelli matematici indicano come un flusso di goccioline oleose che risale da un singolo orifizio attraverso 1000 metri di acqua affiori in superficie in un'area relativamente ristretta. Questo risultato teorico descrive appunto ciò che accade nel Golfo del Messico, dove le tracce iridescenti del petrolio affiorante in superficie da un singolo sbocco occupano un'area non più larga di un centinaio di metri. Nel giro di ore o di giorni, le correnti a diverse profondità sposteranno questa impronta oleosa; ma generalmente il petrolio giunge in superficie a meno di un chilometro o due dalla verticale dello sbocco.

In base a questo approccio si vorrebbe individuare la testa di una chiazza seguendone la coda. E qui il modo intuitivo di procedere si rivela fuorviante. Analogie familiari, come quella del pennacchio di fumo di una sigaretta, potrebbero suggerire che la traccia si assottigli quanto più ci si avvicina al punto di origine. Ma la situazione è fondamentalmente diversa. Mentre le particelle di fumo non potrebbero mai riaggregarsi in una massa concentrata, il petrolio che si riversa in mare coagula, formando le molte bande distinte che si dipartono da un grappolo di sorgenti sul fondo marino. All'inizio della formazione di ogni chiazza, le gocce di petrolio si espandono non appena affiorano in superficie. Simultaneamente il petrolio va alla deriva sotto l'influenza del vento e della corrente. In teoria, una goccia oleosa che galleggia sull'acqua dovrebbe espandersi fino a formare uno strato dello spessore di una molecola. Nella realtà, i margini di uno strato di petrolio si assottigliano fino a che la chiazza non è più in grado di mantenere la propria continuità. Nel senso della corrente rispetto al punto di emersione, lo strato si fa sottilissimo (dell'ordine di 0,1 micrometri), ma comunque assai più spesso rispetto alle dimensioni di una singola molecola. Le singole bande rimangono distinguibili fino a una certa distanza; quindi si fondono e finalmente si dissolvono. La chiazza risulta quindi nel complesso più larga all'origine che non alla sua terminazione.

La lunghezza di una chiazza dipende dalle condizioni della superficie marina. Quando il mare è mosso, uno strato oleoso si rompe piuttosto rapidamente e non è in grado di fare molta strada. Invece, in condizioni di bonaccia, uno strato di petrolio può rimanere visibile

Una cupola di gas idrati e una varietà di organismi di mare profondo circondano uno sbocco di idrocarburi sul fondo del Golfo del Messico, qui ripreso mentre sta visibilmente emettendo bollicine di gas (*a sinistra*). In questo sito, i gas idrati (composti solidi di gas naturale e acqua che si formano in condizioni di alta pressione) sono dimora di un minuscolo animale chiamato verme del ghiaccio (*fotografia al microscopio elettronico, a destra*). Questo strano verme polichete fu osservato per la prima volta nel 1997 da Charles R. Fisher della Pennsylvania State University durante una spedizione insieme con l'autore dell'articolo.

Ian MacDonald

Charles R. Fisher e Rosemary Walsh, Pennsylvania State University

anche per 25 chilometri. I cambiamenti di direzione di una chiazza riflettono il comportamento del vento: ampie curve corrispondono a variazioni graduali nella direzione del vento, mentre pieghe a gomito documentano cambiamenti bruschi. Il tempo trascorso fra un'improvvisa inversione della direzione del vento e il momento in cui un satellite acquisisce un'immagine che mostra la deviazione prodotta permette di risalire alla durata di vita di una chiazza. Utilizzando confronti di questo tipo ho riscontrato, con i miei collaboratori della Texas A&M University, che il petrolio all'estremità di una chiazza visibile galleggia sulla superficie per un tempo compreso tra le 12 e le 24 ore.

Nutrirsi di petrolio

I riversamenti naturali di petrolio possono essere una fortuna per gli oceanografi che tentano di seguire nel dettaglio la circolazione marina o per le compagnie petrolifere in cerca di nuovi giacimenti da sfruttare; ma non costituiscono forse una seria minaccia per la vita marina? Quando l'esistenza delle emissioni naturali di petrolio nel Golfo del Messico cominciò a essere ampiamente riconosciuta, durante gli anni ottanta, il mio collega Mahlon C. Kennicutt e altri ricercatori della Texas A&M University assunsero in prima ipotesi che la fauna vivente attorno agli sbocchi potesse essere considerata un analogo naturale della vita marina esposta all'inquinamento causato dall'uomo. Per raccogliere alcuni di questi campioni presumibilmente «malati», essi trascinarono reti da pesca al di sopra degli sbocchi attivi. Quando recuperarono la rete, trassero a bordo oltre 800 chilogrammi di un'insolita specie di molluschi, *Calyptogena ponderosa*. Stranamente, questo bivalve di grandi dimensioni, che necessita di quantità considerevoli di nutrimento, veniva recuperato da profondità a cui la vita è di norma alquanto scarsa.

Inoltre, presi nella rete a decine, si trovavano fusti fibrosi di colore bruno. Questi oggetti erano così poco consueti che i ricercatori furono sul punto di gettarli a mare, pensando che si trattasse di detriti vegetali terrestri trasportati da una piena del Mississippi e sedimentati sul fondo del Golfo. Ma un membro dell'equipaggio pensò che quel materiale potesse essere utile per intrecciare canestri. Nello scegliere i pezzi più adatti, ne ruppe alcuni, e la vista di una rossa linfa simile a sangue che si spandeva sul ponte della nave fece comprendere come ci si fosse imbattuti in qualcosa di totalmente inatteso.

I campioni furono inviati in visione a esperti di tutto il mondo. Nei mesi e negli anni seguenti, iniziò a emergere una storia assai interessante. Gli idrocarburi che filtrano dal fondo marino costituiscono una fonte di energia chimica che alimenta creature simili alla fauna scoperta per la prima volta in corrispondenza delle bocche idrotermali dell'Oceano Pacifico nel 1977. Anellidi tubicoli (i «fusti fibrosi»), bivalvi giganti e un particolare mitilo prosperano in entrambi gli habitat grazie alla loro simbiosi con batteri endocellulari, che sintetizzano nuovo materiale organico anche in assenza di luce solare utilizzando l'energia derivante dall'ossidazione di composti ridotti come l'acido solfidrico.

Il ritrovamento di questi animali nel Golfo del Messico indusse i ricercatori a dare uno sguardo più ravvicinato a quello strano ambiente. Nel 1986 guidai la spedizione che prevedeva la prima immersione con mezzo sottomarino di ricerca per lo studio di uno sbocco di idrocarburi. I miei colleghi e io ci aspettavamo di dover cercare a lungo prima di imbatterci in qualche anellide tubicolo. Invece ci ritrovammo proprio nel mezzo di un rigoglioso habitat di fondo marino, dove si potevano osservare vasti letti di mitili raccolti attorno a sbocchi gorgoglianti di gas ed estesi tappeti vivacemente colorati di batteri. Di queste esotiche specie si nutriva un variegato insieme di pesci, crostacei e altri invertebrati che, normalmente, si trovano in numero inferiore anche in acque meno profonde.

Sappiamo ora che ecosistemi di questo tipo esistono in svariate parti del Golfo. Fatto interessante, alcune delle attività biologiche che si verificano in corrispondenza degli sbocchi di idrocarburi tendono a sigillare i pori e le fessure attraverso cui filtrano gli idrocarburi stessi. I sottoprodotti del metabolismo batterico, in particolare, causano la precipitazione di carbonato di calcio, e ciò talvolta conduce alla formazione di «pavimenti» in grado di intrappolare il petrolio. La formazione dei cosiddetti gas idrati sul fondo marino può altresì tappare gli sbocchi attivi di gas.

I gas idrati sono sostanze simili a ghiaccio che si formano in condizioni di alta pressione e temperatura bassa (anche se sopra il punto di congelamento dell'acqua), quando molecole di metano e altri gas rimangono intrappolate in un reticolo di molecole d'acqua. I gas idrati hanno ricevuto per la prima volta attenzione quando si è visto che potevano ostruire i gasdotti, imponendo cospicue spese per il riscaldamento e la coibentazione delle tubazioni posate sul fondo marino. Più recentemente, i ricercatori hanno rivolto la loro attenzione ai gas idrati che cristallizzano al di sotto del fondo marino.

La natura inquina?

Quanto petrolio si riversa naturalmente nel Golfo del Messico? Assumendo, per fare un calcolo prudente, che una singola striscia abbia una larghezza di circa 100 metri e che mantenga uno spessore medio di 0,1 micrometri per una decina di chilometri, essa conterrebbe circa 100 litri di petrolio. Una striscia del genere, in mancanza di alimentazione, dura meno di 24 ore: pertanto, se essa rimane in equilibrio, ciò significa che la sua sorgente sta erogando 100 litri al giorno. Valutando, ancora prudentemente, che in ogni momento vi sia almeno un centinaio di queste emissioni, si può calcolare che in un decennio si riversino nel Golfo quasi 40 milioni di litri.

Dobbiamo ricordare a questo punto che l'incagliamento della *Exxon Valdez*, che viene considerato il più grave tra i disastri ecologici causati da incidenti a petroliere, disperse più o meno la stessa quantità di petrolio nel Prince William Sound in Alaska. Si rimane quindi sbalorditi nel considerare che i riversamenti nel Golfo del Messico continuano da un milione di anni o più. Evidentemente, l'ecosistema è stato in grado di far fronte a un cronico inquinamento di petrolio ben prima che fosse coniato il termine «inquinamento».

Il confronto tra i riversamenti naturali di petrolio attraverso faglie o fessure e quelli dovuti a incidenti in fase di trivellazione o di trasporto può essere istruttivo. Nel Golfo del Messico, e probabilmente anche in altre parti del mondo, le perdite naturali occorse nei millenni equivalgono almeno alla quantità di idrocarburi finora estratta dall'industria petrolifera. Ma se anche le quantità complessive sono equivalenti per ordine di grandezza, i tassi di estrazione non lo sono affatto. Rispetto alla natura, l'umanità ha una fretta tremenda di estrarre dalle viscere della Terra tutto il petrolio possibile.

Questa differenza spiega perché un riversamento naturale di petrolio non sia equivalente a un incidente di petroliera, anche se le quantità in gioco possono essere identiche: con la stessa quantità d'acqua si può fare la doccia ogni giorno per un anno intero oppure si può riempire una piscina nella quale affogare. L'esistenza dei riversamenti naturali di petrolio in mare non rende in alcun modo meno grave l'inquinamento per cause non naturali. Mentre il mare aperto è in grado di tollerare il riversamento di centinaia di tonnellate di petrolio in un mese, se questo si distribuisce in strati sottilissimi per decine di migliaia di chilometri quadrati, lo stesso quantitativo disperso in un'area di nidificazione di uccelli marini può comportare la scomparsa delle popolazioni avicole locali. Analogamente, la dispersione cronica di petrolio in un estuario può distruggere quell'ecosistema.

Scienziati e ambientalisti devono riconoscere che mentre alcuni riversamenti di petrolio possono essere devastanti, altri vanno considerati come eventi non nocivi e perfino benefici per l'ambiente marino naturale. Si tratta di distinguere una tipologia di eventi dall'altra, in modo da attuare interventi appropriati a seconda dei casi.

IAN R. MACDONALD ha iniziato a occuparsi di scienze marine lavorando come volontario allo sviluppo di vivai ad Haiti. Dopo un periodo all'International Ocean Institute di Malta e alla FAO (a Malta e a Roma) ha fatto ritorno negli Stati Uniti ed è entrato alla Texas A&M University. Qui ha ottenuto il dottorato nel 1990 dopo avere studiato l'ecologia delle comunità biologiche che si sviluppano in corrispondenza dei riversamenti naturali di petrolio nel Golfo del Messico.

KVENVOLDEN K. A., *Reassessment of the Rates at which Oil from Natural Sources Enters the Marine Environment* in «Marine Environmental Research», 10, pp. 223-243, 1983.

MacDONALD I. R. e altri, *Natural Oil Slicks in the Gulf of Mexico Visible from Space* in «Journal of Geophysical Research», 98, n. C9, 15 settembre 1993.

MacDONALD I. R. e altri, *Remote Sensing Inventory of Active Oil Seeps and Chemosynthetic Communities in the Northern Gulf of Mexico* in *Hydrocarbon Migration and its Near-Surface Expression*, a cura di D. Schumacher e M. A. Abrams, American Association of Petroleum Geologists Memoir 66, 1996.

Il giorno in cui la sabbia prese fuoco

di Jeffrey C. Wynn ed Eugene M. Shoemaker

Un sito di impatto nel deserto arabo testimonia la terribile potenza distruttiva delle meteoriti

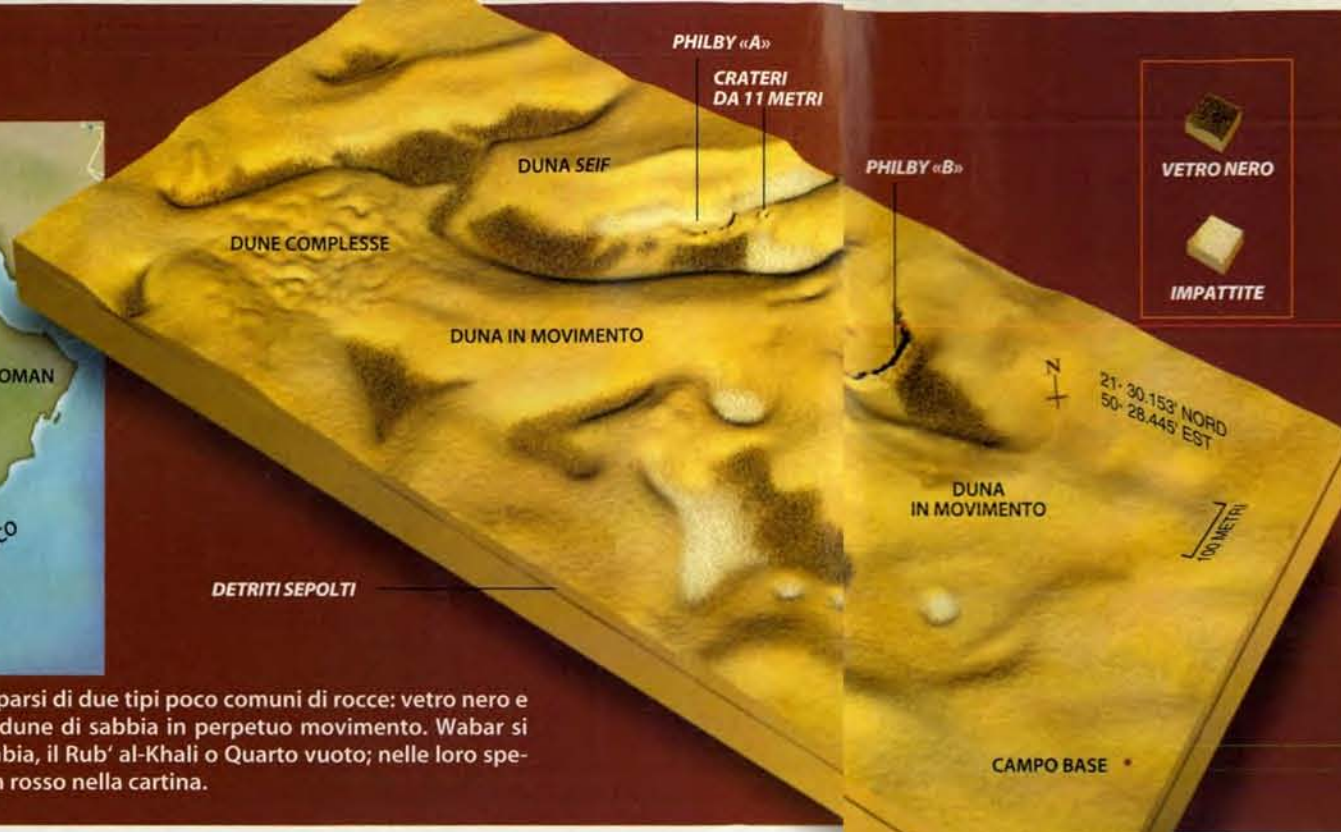
Don Dixon

Immaginate per un attimo di trovarvi nel cuore del deserto e di osservare l'orizzonte al crepuscolo. Il paesaggio è assolutamente desolato: enormi, mutevoli dune di sabbia grigiastra si estendono a perdita d'occhio in tutte le direzioni. Non si vede una sola roccia, e l'essere umano più vicino è a non meno di 250 chilometri. Sebbene il Sole sia già calato, l'aria è ancora calda - circa 50 gradi Celsius - e offuscata dalle ultime nubi di sabbia sollevate dalla tempesta pomeridiana. Il vento prevalente soffia da sud, come sempre all'inizio della primavera.

All'improvviso, la vostra attenzione è attratta da una luce brillante al di sopra dell'orizzonte che si scurisce. Dapprima solo una scintilla, diviene rapidamente più luminosa e si divide in almeno quattro scie distinte. Entro pochi secondi è diventata un lampo abbacinante e caldissimo, che incendia i vostri abiti. L'oggetto brillante passa silenziosamente sopra di voi, seguito un attimo dopo da un frastuono assordante. La terra trema e un'onda d'urto vi scaglia a una cinquantina di metri di distanza; dietro di voi, cortine incandescenti di fiamma erompono nel cielo della sera, e massi bianchi volano nell'aria. Alcuni ricadono nella sabbia; altri sono inghiottiti dal fuoco.

Un liquido lucente ha ricoperto i massi con spruzzi che dapprima sembrano vernice

Il sito di impatto di Wabar

Il sito di Wabar è costituito da tre crateri e da depositi sparsi di due tipi poco comuni di rocce: vetro nero e «impattite». Gran parte del sito è ormai sepolta sotto dune di sabbia in perpetuo movimento. Wabar si trova presso il centro di una regione disabitata dell'Arabia, il Rub' al-Khali o Quarto vuoto; nelle loro spedizioni gli autori hanno seguito i due percorsi indicati in rosso nella cartina.

Laurie Grace (mappa); Slim Films (illustrazione)

bianca, ma poi, solidificando, diventano via via gialli, arancioni, rossi e infine neri: il tutto nei pochi secondi che impiegano per ricadere a terra. Alcuni frammenti di roccia bianca sono rivestiti dal materiale nero, di aspetto spugnoso e vetroso, e così leggero che potrebbe galleggiare sull'acqua (ammesso che ce ne fosse nei dintorni). Una nube a fungo incandescente si allarga sopra di voi, trascinata dalla brezza, riflettendo in uno spettacolo fantastico i colori del tramonto, mentre dall'alto piovono pezzetti di vetro fuso rosso-nerastro.

Nel cuore del leggendario «Quarto vuoto» dell'Arabia Saudita - il Rub' al-Khali - si trova una strana area, di circa mezzo chilometro quadrato, coperta di frammenti di vetro nero, rocce bianche e schegge ferrose. Venne descritta per la prima volta nel 1932 da Harry St. John «Abdullah» Philby, esploratore inglese forse più noto quale padre della famigerata spia sovietica Kim Philby. Quel sito era noto da generazioni ai beduini nomadi al-Murra con il nome di al-Hadida, «le cose di ferro».

Vi è una storia, riportata nel Corano e in scritti classici arabi, riguardo a un re idolatra di nome Aad che disprezzò un profeta di Dio. Per la sua empietà, la città di Ubar e tutti i suoi abitanti furono distrutti da una nube nera portata sulle ali di un grande vento. Quando i viaggi di Philby lo condussero nel Quarto vuoto, le sue guide gli dissero che conoscevano la città distrutta e si offrirono di portarlo sul posto. Philby accettò volentieri di visitare quella che nei suoi resoconti traslitterò come «Wabar», nome che da allora si è conservato.

Ciò che trovò non era né la perduta Ubar né una conferma del racconto del Corano. Ma certamente era il luogo di un cataclisma venuto dal cielo: l'arrivo di una meteorite. Dalle tracce rimaste, possiamo stimare che l'impatto debba essere stato indistinguibile da un'esplosione nucleare di circa 12 chiloton, paragonabile alla bomba di Hiroshima. Non è stata la collisione più violenta fra quelle che hanno lasciato cicatrici sulla Terra. E tuttavia Wabar occupa un posto speciale. Quasi tutti gli impatti noti sono avvenuti su roccia solida o al più ricoperta da un sottile strato di suolo o acqua. L'oggetto di Wabar, viceversa, cadde nel mezzo della più ampia distesa ininterrotta di sabbia del mondo. Questo luogo arido e isolato è forse il meglio conservato e geologicamente più semplice fra tutti i siti di caduta di meteoriti. Inoltre è una delle sole 17 località - su circa 160 strutture da impatto note - che conservi ancora resti del proiettile celeste.

Nel corso di tre estenuanti spedizioni nel cuore del deserto, abbiamo ricostruito la sequenza degli eventi svoltisi a Wabar. La caduta di meteoriti è un fenomeno che si è ripetuto assai spesso nella storia geologica e biologica della Terra; e anche oggi il sistema solare non ha cessato di essere un poligono di tiro. Sebbene le meteoriti molto grandi siano quelle che attirano maggiormente l'attenzione - almeno da parte di Hollywood - la minaccia più tangibile per le nostre città proviene da oggetti più piccoli, come quello che precipitò a Wabar. Studiando questo e analoghi siti, si può stimare la frequenza dei proiettili cosmici che colpiscono la Terra. Se siamo oggetto di un tiro al bersaglio, possiamo se non altro consolarci stabilendo quanto spesso possono verificarsi impatti pericolosi.

Non si può fare a meno di chiedersi fino a che punto le guide beduine di Philby conoscessero Wabar, posta nel mezzo di una distesa di dune priva di punti di riferimento, in un paesaggio in continuo mutamento. Anche i nomadi del deserto, celebri per la loro resistenza, evitano il cuore arido del Quarto vuoto. Philby impiegò quasi un mese per arrivarci; diversi cammelli morirono lungo il cammino e gli altri furono ridotti al limite delle forze. «Erano davvero una vista deprimente quando arrivammo alla Mecca il novantesimo giorno, magri, senza gobba e malridotti» disse Philby a una riunione alla Royal Geographical Society tenuta dopo il suo ritorno a Londra nel 1932.

Cose dell'altro mondo

Philby fu il secondo occidentale (dopo il britannico Bertram Thomas) ad attraversare il Quarto vuoto. Giunto sul sito, cercò manufatti umani, resti di mura crollate. Le guide gli mostrarono «perle nere» sparse sul terreno, a loro detta i gioielli delle donne della città distrutta. Ma Philby era perplesso e deluso: vedeva solo scorie nerastre, pezzi di arenaria bianca e due depressioni circolari parzialmente sepolte che ricordavano un vulcano. Una guida gli portò un frammento ferroso lungo diverse decine di centimetri. Opera degli antichi abitanti di Ubar? A poco a poco Philby si rese conto che il frammento di metallo arrugginito non doveva essere di origine terrestre. Esami di laboratorio mostrarono poi che conteneva oltre il 90 per cento di ferro, il 3,5-5 per cento di nichel e 4-6 parti per milione di iridio, un elemento raro sulla Terra ma comune nelle meteoriti.

Il vero sito della città di Ubar, situata nell'Oman meridionale circa 400 chilometri a sud di Wabar, è stato individuato nel 1992 con l'aiuto di immagini da satellite. Wabar, a sua volta, rimase per lo più inesplorato fino alle nostre spedizioni del maggio 1994, dicembre 1994 e marzo 1995. Il sito, visitato almeno due volte dopo il 1932, non era stato mai rilevato accuratamente.

Non capimmo veramente il perché di questa dimenticanza fino al nostro primo viaggio. Uno di noi (Wynn) aveva partecipato a un'escursione organizzata dalla Zahid Tractor Corporation, una compagnia saudita che distribuisce i veicoli fuoristrada Hummer. Per promuovere le vendite, un gruppo di manager della Zahid, fra cui Bill Chasteen e Wafa Zawawi, si propose di compiere la traversata del Quarto vuoto e invitò la missione dello US Geological Survey a Jeddah a far partecipare uno scienziato. Non sarebbe stata una gita fuori porta: l'impresa richiese equipaggiamento speciale e due mesi di preparazione. Nessuno aveva mai attraversato il Quarto vuoto d'estate. Se qualcosa fosse andato storto, se un veicolo si fosse guastato, la carovana avrebbe dovuto cavarsela da sola: le lunghe distanze, le temperature elevate e il terreno a dune irregolari impediscono l'impiego di velivoli di soccorso.

Un normale veicolo a quattro ruote motrici impiegherebbe da tre a cinque giorni per coprire i 750 chilometri che separano Riyadh da Wabar; affonderebbe nella sabbia ogni 10 minuti e dovrebbe esserne estratto con l'aiuto di apposite rampe e verricelli. Uno Hummer ha il vantaggio di poter variare la pressione interna degli pneumatici durante la marcia. Anche così, gli autisti della spedizione impiegarono diversi giorni prima di imparare a superare le dune. Con un'adeguata esperienza, il viaggio fino a Wabar richiede 17 interminabili ore. L'ultimo, lungo tratto consiste nell'attraversamento delle dune e deve essere effettuato di notte, con i fari alogeni montati sui paraurti che aiutano a individuare le imprevedibili «rupi di sabbia» alte anche 15 metri.

La nostra prima spedizione rimase sul sito per sole quattro ore prima di ripartire. A quel punto solo quattro su sei veicoli avevano i condizionatori dell'aria ancora funzionanti. La temperatura esterna era di 61 gradi Celsius all'ombra di una tenda, con un'umidità incredibilmente bassa: il 2 per cento. Wynn uscì dal veicolo per eseguire una misurazione geomagnetica, e quando tornò barcollava e parlava incoerentemente un misto di inglese e arabo. Solo dopo che gli fu versata acqua sulla testa e gli fu diretto sul viso un getto di aria fredda, riuscì a riprendersi.

La Zahid finanziò anche la seconda e la terza spedizione. Nel corso di quest'ultima, durata una settimana, furiose tempeste di sabbia distrussero due volte il campo, e la temperatura non scese mai sotto i 40 gradi, anche di notte. Ognuno di noi teneva un thermos da due litri accanto al proprio giaciglio; la sensazione di bruciore in gola ci svegliava ogni ora.

Rocce da impatto

Il sito di Wabar ha dimensioni di circa 500 per 1000 metri. Ci sono almeno tre crateri, due (del diametro

Jeffrey C. Wynn

Questo cratere ricolmo di sabbia, del diametro di 11 metri, fu scoperto dagli autori durante la loro spedizione a Wabar del dicembre 1994. Al di sotto dello strato di sabbia, il cratere è rivestito da una roccia bizzarra - l'impattite - che si pensa si sia formata da grani di sabbia fusi insieme dall'immensa pressione. Intorno al bordo del cratere sono sparsi frammenti di ferro e nichel della grandezza di pochi centimetri. Dalla dimensione del cratere, i geologi stimano che esso si formò quando una meteorite metallica di alta densità, del diametro di circa un metro, precipitò nella sabbia. Questa meteorite si era staccata da uno dei corpi principali che produssero gli altri due crateri di Wabar.

Identificare i crateri da impatto

In che modo si possono identificare i crateri dovuti a impatti meteoritici? Non è una cosa facile. La Luna è butterata di crateri, non avendo acqua, fenomeni atmosferici, zolle tettoniche: i crateri restano là dove si sono formati, senza essere alterati dal trascorrere del tempo. Sulla Terra, invece, i fattori ambientali hanno levigato una superficie che altrimenti sarebbe stata altrettanto bucherellata. A confondere ulteriormente la situazione, vi sono altri processi più familiari - come il vulcanismo e l'erosione - che possono lasciare cavità circolari. Solo all'inizio di questo secolo i geologi poterono raggiungere la certezza che alcuni crateri sono realmente causati da meteoriti. Anche oggi, le strutture da impatto note sono solo 160 circa.

Solo il 2 per cento circa degli asteroidi che percorrono il sistema solare interno è costituito di ferro e nichel, i cui frammenti sono piuttosto facili da riconoscere come di origine esterna. Ma altri tipi di meteoriti si possono confondere con le rocce del sito di impatto. Il luogo dove è più facile trovare questi oggetti è l'Antartide, perché nel mezzo delle distese di ghiaccio polari si trovano ben poche altre rocce. Altrove, per riconoscere un cratere meteoritico occorrono accurati rilevamenti topografici e prove di laboratorio. I geologi cercano di identificare alcune caratteristiche distintive, prodotte dalle enormi velocità e pressioni associate agli impatti. Anche un'eruzione vulcanica non sottopone le rocce a condizioni così estreme.

• **Coni di frammentazione.** Queste impressioni cuneiformi si trovano nelle rocce che circondano un cratere. Occasionalmente le si può vedere in affioramenti rocciosi, se i coni si sono fratturati nel senso della lunghezza. A Wabar non vi sono coni di frammentazione, perché il sito è formato solo da sabbia.

• **Tipi di roccia formati ad alta temperatura.** Blocchi di sabbia laminati e fusi sono stati osservati sia a Wabar sia nei siti di esplosioni nucleari. Oltre a ciò, in molti grandi siti di impatto compaiono tectiti, ovvero rocce vetrose che si ritiene abbiano origine quando roccia fusa è scagliata in aria ad alta quota e poi solidifica nel precipitare.

• **Deformazioni microscopiche.** La struttura cristallina di alcuni minerali è trasformata dalle onde d'urto durante un impatto. Nel quarzo, per esempio, si formano striature orientate in più di una direzione. Esso può anche ricristallizzare in nuovi minerali, come la coesite e la stishovite, che sono rivelabili solo mediante diffrazione dei raggi X.

Carolyn Shoemaker

di 116 e 64 metri) individuati da Philby, e l'altro (di 11 metri) scoperto da Wynn durante la nostra seconda spedizione. Tutti e tre sono quasi completamente colmati di sabbia. I bordi oggi visibili sono composti da sabbia ammucchiata, ancorata sul posto da una roccia chiamata «impattite» - un'arenaria biancastra, grossolana - e da grandi quantità di scorie e piccoli frammenti di vetro nero. Questi bordi sabbiosi vengono danneggiati facilmente dalle ruote dei veicoli. Sono presenti anche occasionali frammenti di ferro-nichel.

I geologi possono dedurre che un cratere è stato prodotto dall'impatto di una meteorite - e non da altri processi come erosione o vulcanismo - osservando i segni lasciati dall'azione delle onde d'urto nelle rocce. Le impattiti di Wabar non lasciano alcun dubbio: sono grossolanamente laminate, come altre arenarie, ma queste laminazioni sono costituite da grani di sabbia saldati insieme e frammezzati da vuoti nastriformi. Talvolta tutti gli strati si piegano e si torcono in maniera perfettamente identica, al contrario delle altre arenarie. Le laminazioni sono probabilmente perpendicolari al percorso di un'onda d'urto. Inoltre l'impattite contiene coesite, una forma di quarzo alterata da una pressione intensissima, che è stata individuata solo nei siti di esplosioni nucleari e di cadute di meteoriti. Esperimenti di diffrazione di raggi X mostrano che la coesite ha una struttura cristallina insolita, dovuta alle enormi sollecitazioni subite.

L'impattite è concentrata sui bordi sudorientali dei crateri ed è quasi totalmente assente sui lati nord e ovest. Questa asimmetria fa pensare che l'impatto sia stato obliquo, con gli oggetti in caduta che provenivano da nord-ovest a un angolo compreso fra 22 e 45 gradi rispetto all'orizzontale.

Gli altri due tipi di roccia trovati a Wabar sono pure indizi inequivocabili di impatto. I frammenti di ferro-nichel sono pressoché inesistenti nel resto del deserto, sicché si può concludere che debbano essere parti della meteorite stessa. Si trovano due forme di questi frammenti. Quelli sepolti sotto la sabbia sono sfere rugginose di diametro fino a 10 centimetri, solcate da fenditure, che si sbriciolano se tenute in mano. Daniel M. Barringer, un ingegnere minerario che all'inizio del secolo eseguì perforazioni in cerca di ferro nel Meteor Crater in Arizona, chiamò questi frammenti, che si trovano in diversi siti di impatto meteoritico, «sfere argillitiche».

I frammenti ferrosi che affiorano in superficie sono generalmente levigati, coperti da una sottile patina lucente dovuta all'alterazione da parte dell'ambiente desertico. Il più grande fra i campioni di ferro-nichel è la «Gobba del cammello», ritrovata da una spedizione nel 1965 ed esposta alla King Saud University di Riyadh. Questo frammento appiattito, a forma di cono, del peso di 2200 chilogrammi, probabilmente si staccò dal corpo principale della meteorite prima dell'impatto. Poiché l'area superficiale di un oggetto è proporzionale al quadrato del raggio, mentre la massa è proporzionale al cubo del raggio, un oggetto più piccolo avverte un attrito atmosferico proporzionalmente maggiore. Quindi un frammento staccatosi dal proiettile celeste rallenta di più rispetto al corpo principale, e quando atterra può rimbalzare anziché scavare un cratere.

Il secondo caratteristico tipo di roccia presente a Wabar è lo strano vetro nero. Accade spesso di trovare nei siti di impatto rocce vetrose, che presumibilmente si formano da globuli di materia fusa espulsi dal cratere. Presso i margini dei crateri di Wabar il vetro nero assomiglia superficialmente alla pahoehoe delle Hawaii, una roccia corrugata, dall'aspetto di corda, formatasi dal raffreddamento di flussi di lava densa. Più in là, i frammenti vetrosi diventano più piccoli e simili a gocce. Minuscole palline di pochi millimetri si trovano fino a circa 850 metri a nord-ovest dei crateri; se ce ne sono di ancora più distanti, le dune devono averle coperte. L'analisi chimica dimostra che il vetro ha composizione uniforme: circa il 90 per cento di sabbia locale e il 10 per cento di ferro e nichel. Questi ultimi appaiono come minuscole sferette in una matrice di sabbia fusa. Alcuni frammenti vetrosi sono molto sottili: abbiamo trovato spruzzi solidificati simili a filigrana, così delicati che si spezzano se si cerca di asportarli dal sito, per quanto siano accuratamente avvolti.

La distribuzione dei frammenti indica che il vento spirava da sud-est al momento dell'impatto. Nella parte settentrionale del Quarto vuoto la direzione del vento è stagionale: per 10 mesi dell'anno soffia da nord, scolpendo le immense dune a forma di mezzaluna dette barcane. Ma all'inizio della primavera il vento cambia direzione e giunge da sud-est. È la stagione delle tempeste di sabbia che tanto preoccuparono i militari durante la guerra del Golfo, e coincide con la stagione dei monsoni nel Mare Arabico. In tutti i periodi dell'anno, l'aria è immobile quando il Sole si leva, ma inizia ad agitarsi nel primo pomeriggio. Al crepuscolo il vento è così forte che la sabbia punge il viso; nelle nostre spedizioni, dovevamo portare maschere da subacquei per riuscire a vedere qualcosa mentre montavamo le tende. Verso mezzanotte, il vento scema di nuovo.

Cortine di fuoco

Bianco e nero: il sito di Wabar offre ben poco d'altro. Questa dicotomia fa pensare che a formare le rocce sia stato un processo assai uniforme. L'impatto interessò esclusivamente lo strato di sabbia; non vi è alcuna prova che abbia raggiunto la roccia sottostante. In effetti, le nostre ricognizioni non hanno rivelato alcuna traccia di affioramenti rocciosi nel giro di 30 chilometri all'intorno.

Dai dati raccolti nelle nostre spedizioni e dai modelli di impatti realizzati da H. Jay Melosh ed Elisabetta Pierazzo dell'Università dell'Arizona, abbiamo ricostruito la seguente successione di eventi a Wabar.

La meteorite giunse da nord-ovest, con angolazione abbastanza bassa; l'impatto potrebbe essere avvenuto nel tardo pomeriggio o nella prima serata, probabilmente verso l'inizio della primavera. Come la maggior parte delle meteoriti, il nostro oggetto entrò nell'atmosfera a una velocità di 11-17 chilometri al secondo. Dato l'angolo accentuato della sua traiettoria, esso impiegò più tempo ad attraversare l'atmosfera di quanto avrebbe fatto se fosse precipitato verticalmente. Di conseguenza, l'attrito atmosferico ebbe su di esso un effetto più pronunciato, accentuandosi via via che il proiettile penetrava in strati sempre più densi dell'atmosfera. Nella maggior parte delle meteoriti, l'attrito riesce a vincere la coesione della roccia a una quota di 8-12 chilometri, e l'oggetto esplode a mezz'aria. La meteorite di Wabar, grazie alla sua composizione ferrosa, resistette più a lungo; tuttavia finì per spezzarsi in almeno quattro

METEORITE CHE SI DEFORMA
FRAMMENTI STACCATI PER SCHEGGIATURA
IMPATTITE
ZONA FUSA
SABBIA INTATTA
SABBIA DEFORMATA
SABBIA INTATTA

Slim Films

Un impatto meteoritico visto in sezione - ricostruito mediante simulazioni al calcolatore - mostra come si sono formati i crateri di Wabar. La meteorite si è schiacciata toccando il suolo; l'onda d'urto si è propagata all'indietro nel corpo dell'oggetto, facendo sì che parte di esso si staccasse per scheggiatura, senza quasi subire danni; il resto della meteorite si è fuso e amalgamato con la sabbia immediatamente sottostante; la sabbia circostante è stata compressa in impattite. La miscela è stata quindi scagliata in aria. Gli strati più profondi di sabbia sono rimasti relativamente intatti.

Jeffrey C. Wynn

Il secondo per grandezza fra i crateri di Wabar, chiamato Philby «A», è stato ormai quasi sepolto dal lento movimento di una duna *seif* («spada» in arabo). Solo il suo bordo sudorientale, consolidato da roccia ghiaiosa formatasi al momento dell'impatto, sporge ancora al di sopra della sabbia. Il cratere, del diametro di 64 metri, segna il punto di caduta di una meteorite di 5 metri, uno dei frammenti in cui si è suddiviso l'oggetto originario (che si è spezzato durante la discesa in atmosfera). I frammenti hanno colpito il suolo a velocità fino a 25 000 chilometri all'ora.

frammenti e rallentò fino a metà della sua velocità iniziale. I calcoli indicano una velocità al momento dell'impatto compresa tra 5 e 7 chilometri al secondo.

La relazione generale fra grandezza della meteorite, diametro del cratere e velocità di impatto è nota da modelli teorici, esperimenti balistici e dall'osservazione di esplosioni nucleari. In linea generale, i crateri scavati nella roccia sono una ventina di volte più grandi degli oggetti che li hanno prodotti; in un terreno sabbioso, che assorbe con maggiore efficienza l'energia dell'impatto, il fattore è più vicino a 12. Pertanto il più grande degli oggetti caduti a Wabar doveva avere un diametro compreso tra 8 e 9,5 metri, assumendo che la velocità di impatto fosse rispettivamente di 7 o 5 chilometri al secondo. La massa complessiva dell'oggetto di partenza era di almeno 3500 tonnellate, e la sua energia cinetica originaria corrispondeva a un'esplosione di 100 chiloton di tritolo. Dopo il frenamento dovuto all'attrito atmosferico, il frammento maggiore colpì il suolo con un'energia compresa fra 9 e 13 chiloton. È una quantità di energia confrontabile con quella liberata dalla bomba di Hiroshima, sebbene in quest'ultimo caso la distruzione sia stata più estesa perché l'esplosione avvenne in aria anziché a livello del suolo.

Nel punto di impatto, una cortina conica di fluido bollente - una miscela di materiale appartenente alla meteorite e di sabbia locale fusi - eruppe nell'aria e solidificandosi formò il vetro nero. La cortina infuocata si espanse rapidamente nei pochi millisecondi in cui la meteorite entrò in collisione con il terreno; il proiettile stesso fu compresso e appiattito in questo tempo brevissimo. Un'onda d'urto si propagò all'indietro attraverso l'oggetto; quando ne raggiunse la parte posteriore, staccò per scheggiatura piccoli frammenti dotati di modesta velocità. Alcuni di questi frammenti furono inghiottiti dalla cortina incandescente, ma i più sfuggirono e ricaddero mollemente nella sabbia circostante, fino a 200 metri di distanza. Essi si ritrovano oggi come resti intatti della meteorite originaria. (Lo stesso fenomeno è persino in grado di staccare frammenti della superficie di un pianeta senza sottoporli a calore e pressione intensi. Le famose meteoriti marziane, per esempio, hanno conservato le loro delicate microstrutture nonostante il fatto che sono state espulse nello spazio.)

Un'onda d'urto si propagò anche verso il basso, riscaldando e miscelando la sabbia. Il rapporto fra ferro e sabbia nelle sferette vetrose fa pensare che il volume di sabbia fusa sia stato 10 volte maggiore di quello della meteorite, ovvero una semisfera del diametro di 27 metri. All'esterno di questo volume l'onda d'urto, via via indebolendosi, non fuse la sabbia ma la compattò in una «roccia istantanea»: l'impattite.

L'onda d'urto causò poi un'eruzione della superficie: una parte dell'impattite fu scagliata verso l'alto nel materiale vetroso fuso e subì un secondo shock. Nei campioni di roccia questa miscela appare come una spessa vernice nera spruzzata sull'impattite. Altri frammenti di impattite furono completamente immersi nel vetro a una temperatura di 10 000-20 000 gradi Celsius; l'arenaria subì un'ulteriore trasformazione in vetro ricco di bolle.

Il cratere più grande si formò in poco più di due secondi, il più piccolo in quattro quinti di secondo soltanto. Inizialmente i crateri avevano una forma provvisoria più ampia, ma entro pochi minuti la materia che ricadde dall'alto scivolò giù lungo i loro fianchi e ne ridusse il volume. Il più grande dei crateri provvisori aveva probabilmente un diametro di 120 metri. Tutta la sabbia che si trovava in precedenza sul posto fu sollevata in una nube a fungo che si alzò per migliaia di metri, forse addirittura fino alla stratosfera. Bastò una brezza relativamente debole per disperdere il vetro fuso fino a 850 metri di distanza.

Joe Polimeni e Bill Chasteen, Zahid Tractor Corporation e A. M. General Corporation

La coltre di materiale espulso al margine del cratere Philby «A» consiste di tre tipi di resti dell'evento: impattite bianca (una roccia simile all'arenaria formata da sabbia compressa), vetro nero (analogo a lava e originato da sabbia fusa) e frammenti della meteorite (ferro quasi puro, con un poco di nichel). Gli autori, che indossano tute speciali per proteggersi dal clima estremo, stanno usando magnetometri per cercare i pezzi della meteorite. L'antenna sul veicolo bianco serve per la localizzazione con il Global Positioning System, un ausilio essenziale per orientarsi nel cuore del deserto.

Una lenta scomparsa

E quando avvenne tutto ciò? Per lungo tempo questa è stata una delle principali domande riguardo a Wabar. La prima datazione assegnata all'evento, sulla base di analisi delle traiettorie di prodotti di fissione eseguite all'inizio degli anni settanta su campioni di vetro che erano giunti al British Museum e alla Smithsonian Institution, collocò l'impatto circa 6400 anni fa. I dati raccolti sul campo, tuttavia, fanno pensare a un evento più recente. Il cratere maggiore era profondo 12 metri nel 1932, otto metri nel 1961 e quasi colmo di sabbia nel 1982. Il bordo sudorientale era alto solo tre metri circa durante le nostre visite del 1994 e 1995. E, a quanto se ne sa, non vi è alcun meccanismo capace di svuotare dalla sabbia un cratere, una volta colmato.

Il sito di Wabar sarebbe forse già scomparso se la sabbia non fosse ancorata dalla presenza di impattite e vetro. Almeno due dei crateri hanno alla base uno strato di impattite, che rappresenta la superficie originaria dell'incavo prima che fosse riempito di sabbia. Siamo riusciti a raccogliere diversi campioni di sabbia sotto il rivestimento di impattite per datarli con il metodo della termoluminescenza. I risultati, ottenuti da John Prescott e Gillian Robertson dell'Università di Adelaide, indicano che l'evento ebbe luogo meno di 450 anni fa.

Il dato più interessante che concorda con una cronologia recente riguarda le meteoriti di Nejd, recuperate dopo che una «palla di fuoco» passò sopra Riyadh nel 1863 o nel 1891, a seconda della versione a cui si presta fede. A quanto pare, l'oggetto procedeva in direzione di Wabar, e le meteoriti di Nejd sono identiche per composizione ai campioni di questo sito. Perciò è probabile che l'impatto di Wabar sia avvenuto solo 135 anni fa; forse i nonni delle guide di Philby scorsero l'esplosione da grande distanza.

David Morrison NASA/Ames Research Center; Laurie Grace

La frequenza media di impatti sulla Terra può essere stimata dalla quantità di piccoli corpi che percorre il sistema solare e dalla distribuzione osservata dei crateri lunari. Una meteorite del diametro di 2 chilometri, capace di provocare un disastro a scala mondiale, precipita circa ogni milione di anni. (Nel correlare la dimensione dell'oggetto all'energia esplosiva, il grafico considera un asteroide litico in moto alla velocità di 20 chilometri al secondo.)

Determinare la data esatta è un risultato tutt'altro che banale, poiché ci dà un'idea di quanto spesso accadano simili eventi. La frequenza di impatti meteoritici ha un andamento semplicissimo: gli eventi maggiori sono corrispondentemente più rari. Le stime pubblicate più recentemente indicano che oggetti delle dimensioni di quello di Wabar colpiscono la Terra circa una volta ogni 10 anni.

Altri crateri simili, prodotti da meteoriti ferrose, si trovano, per esempio, a Odessa in Texas, Henbury in Australia, Sikhote-Alin in Siberia; ma la maggior parte degli eventi di dimensioni analoghe a quello di Wabar non lascia crateri, neppure temporanei. Questi impatti sono dovuti a meteoriti litiche, che non possiedono l'integrità strutturale del metallo e si spezzano nell'atmosfera. Da un lato, la loro disintegrazione ha la felice conseguenza di proteggere la superficie terrestre dagli impatti diretti. Sulla Terra vi sono relativamente pochi crateri di diametro inferiore a circa 5 chilometri; sembra che i corpi litici che non raggiungono i 100-200 metri siano bloccati dall'atmosfera. D'altra parte, questa schermatura non arreca solo vantaggi, come si potrebbe pensare. Quando una meteorite esplode nell'aria, gli effetti distruttivi sono dispersi su un'area più vasta. Si pensa che l'esplosione di Tunguska, avvenuta in Siberia nel 1908, sia stata causata da un oggetto di composizione litica. Anche se scarsissimi frammenti del corpo originario vennero trovati al suolo, la detonazione abbatté 2200 chilometri quadrati di foresta e appiccò vasti incendi. Non è del tutto improbabile che un disastro del genere prima o poi colpisca una città (per una trattazione del pericolo costituito da comete e asteroidi si veda l'articolo *Oggetti vicini alla Terra: scoperta e difesa* di Andrea Carusi in «Le Scienze» n. 317, gennaio 1995).

Secondo il metro di valutazione degli impatti noti, Wabar e Tunguska sono solo «graffi» sulla superficie terrestre. Molti siti di collisioni sparsi in tutto il mondo, come la struttura ad anello di Manicouagan nel Québec e il sito di Chicxulub nello Yucatán settentrionale, sono enormemente più grandi. Ma simili catastrofi accadono in media solo una volta ogni 100 milioni di anni. L'asteroide del diametro di 10 chilometri che scavò Chicxulub e provocò l'estinzione dei dinosauri colpì la Terra 65 milioni di anni fa e, sebbene almeno due oggetti paragonabili (1627 Ivar e 1998 QS52, quest'ultimo di recentissima scoperta) si trovino su orbite che incrociano quella terrestre, nessun impatto è previsto per un futuro ragionevolmente vicino. Le meteoriti come quella di Wabar sono invece assai più comuni - e più difficili da individuare per gli astronomi - rispetto ai «mostri». Ironicamente, fino alle spedizioni a Wabar, erano proprio gli impatti più frequenti quelli su cui si sapeva di meno; le scorie e le rocce tormentate nel deserto arabo ci hanno ora rivelato nei minimi dettagli quale distruzione riescano a provocare anche meteoriti relativamente piccole.

JEFFREY C. WYNN ed EUGENE M. SHOEMAKER hanno lavorato insieme allo US Geological Survey fino alla morte di Shoemaker, avvenuta in un incidente nel luglio 1997. Wynn ha cartografato il fondo oceanico utilizzando metodi elettrici, gravitazionali e sismici; ha analizzato giacimenti minerari e studiato acquiferi e siti archeologici in tutto il mondo. Ha diretto le missioni dell'USGS in Venezuela dal 1987 al 1990 e in Arabia Saudita dal 1991 al 1995. Shoemaker fu uno dei primi scienziati a riconoscere l'importanza geologica degli impatti meteoritici. Fondò il laboratorio dell'USGS di Flagstaff, in Arizona, dove furono addestrati gli astronauti delle missioni Apollo; instancabile osservatore di comete e di asteroidi presso il Palomar Observatory, fu docente al California Institute of Technology. All'epoca della morte, stava cartografando strutture da impatto nell'interno dell'Australia insieme con la moglie e collaboratrice scientifica, Carolyn Shoemaker.

PHILBY HARRY ST.JOHN B., *An Account of Exploration in the Great South Desert of Arabia* in «Geographical Journal», 81, n.1, gennaio 1933.

MELOSH H. J., *Impact Cratering: A Geologic Process*, Oxford University Press, 1989.

BEATTY J. KELLY, *«Secret» Impacts Revealed* in «Sky & Telescope», 87, n. 2, febbraio 1994.

GEHRELS TOM (a cura), *Hazards Due to Comets and Asteroids*, University of Arizona Press, 1995.

LEWIS JOHN S., *Rain of Iron and Ice: The Very Real Threat of Comet and Asteroid Bombardment*, Addison-Wesley Publishing, 1996.

Ulteriori informazioni sulle strutture da impatto si trovano nel sito Internet http://bang.lanl.gov/solarsys/eng/tercrate.htm

In cerca della misteriosa meteorite della Groenlandia

di W. Wayt Gibbs

La «palla di fuoco» ripresa mentre sfrecciava nei cieli artici nel dicembre 1997 sembrava troppo veloce per essere un oggetto appartenente al sistema solare. Una spedizione durata un mese sull'isola di ghiaccio ha cercato indizi utili per risolvere questo enigma

Una tonnellata di neve, fatta fondere sotto un «lenzuolo» di plastica nera, è stata filtrata nella speranza di trovare polvere dispersa dalla meteorite da 100 tonnellate che si è disintegrata sopra la Groenlandia poco più di un anno fa.

Andy Ryan

L'incredibile notizia giunse attraverso il telefono satellitare verso le 8 di sera, ricorda l'astronomo Lars Lindberg Christensen. Assieme agli altri quattro danesi e due groenlandesi della spedizione, aveva appena finito la cena e sedeva nella tenda comune, cercando di far passare il tempo. Da sette giorni le loro ricerche dei resti della meteorite di Kangilia erano ferme, mentre le voci all'altro capo del telefono ripetevano varianti dello stesso esasperante messaggio: «Restate in attesa... L'elicottero è bloccato dalla nebbia a Kangerlussuaq... È fermo a Paamiut... È stato costretto a tornare a Nuuk dalle condizioni atmosferiche... Aspettate ancora qualche ora...». Nel frattempo il campo base - costruito su uno strato nevoso che non avrebbe potuto trovarsi neppure sulla banchisa polare in un momento così avanzato della breve estate groenlandese - si stava sciogliendo in un acquitrino gelido. Era decisamente tempo di spostarsi sul picco asciutto e roccioso di un *nunatak* e proseguire la ricerca.

Ma ora la voce al telefono stava riferendo notizie buone, anzi incredibili. Una stazione televisiva di Nuuk stava dando la notizia che un guardacaccia aveva trovato la meteorite. Mentre navigava nel labirinto di insenature cosparse di isolotti nei pressi di Qeqertarsuatsiaat, circa 60 chilometri a ovest del campo base, questi aveva visto quattro crateri che apparivano scavati di recente nelle colline presso la costa, con rocce scure al loro interno. «È stato un momento emozionante» raccontò Christensen il mattino dopo. «Eravamo tutti così eccitati. Dobbiamo aver consumato un'ora di telefonata via satellite per rintracciare questo tizio e metterci d'accordo perché ci guidasse sul posto.» Ben presto giunsero altre buone notizie: la perturbazione che aveva bloccato il gruppo si stava infine dissolvendo. L'elicottero li avrebbe raccolti poco dopo l'alba per andare a ispezionare i crateri.

Quella notte Christensen non riuscì a dormire per l'emozione. Il fatto che avessero trascorso due settimane ad attraversare chilometri di ghiaccio, a superare crepacci, a fondere la neve per cercare di recuperare campioni di polvere, a cercare in tutti i modi, ma nei posti sbagliati, non gli importava. «Tutto ciò che contava era che noi, o qualcun'altro, trovassimo qualcosa. I calcoli possono essere sbagliati; si possono fare errori.»

Li possono commettere - sebbene Christensen non faccia nomi - anche scienziati come Torben Risbo e Holger Pedersen. Rispettivamente geofisico e astronomo all'Istituto Niels Bohr di astronomia, fisica e geofisica dell'Università di Copenaghen, i due erano le menti scientifiche dietro questa avventurosa spedizione. Pedersen e Risbo avevano selezionato l'area di ricerca, centinaia di chilometri quadrati ai piedi del Frederikshåbs Isblink, una gigantesca lingua di ghiaccio in lento movimento che nella zona del campo base raggiunge uno spessore di 1200 metri. Inoltre, dopo otto mesi di lavoro investigativo, Pedersen e Risbo avevano quasi convinto se stessi e alcuni altri scienziati che il luminoso oggetto che aveva rischiarato la costa sudoccidentale della Groenlandia il 9 dicembre 1997 avesse un'origine veramente straordinaria. Non semplicemente extraterrestre, ma extrasolare. Interstellare. Il primo ambasciatore conosciuto da un altro sistema stellare, forse a centinaia di anni luce di distanza.

Questa possibilità pesava fortemente sulle spalle del ventisettenne Christensen, il quale era ben conscio che, se fosse riuscito a ritrovare la meteorite (o anche solo un suo minuscolo frammento) i geochimici avrebbero potuto dimostrare che questa ipotesi poco ortodossa era esatta. O, più verosimilmente, sbagliata.

Non che Pedersen appaia il tipo di scienziato disposto a proporre irresponsabilmente una teoria poco plausibile solo per attrarre l'attenzione. Semplicemente, come mi dice il cinquantunenne astronomo nel suo soleggiato e spartano ufficio di Copenaghen, «è così incredibilmente sorprendente che la prima meteorite interstellare a essere scoperta debba avere queste dimensioni». Si stima che la massa dell'oggetto fosse di circa 100 tonnellate prima che l'attrito atmosferico cominciasse a disintegrarlo. «Ci si aspetterebbe di trovare molte meteoriti interstellari più piccole prima di incontrare un oggetto così massiccio» aggiunge, scegliendo le parole con estrema cura. «Perciò si capisce perfettamente il naturale scetticismo verso questa proposta.»

Pedersen era consapevole del pericolo a cui questo sconfinamento al di fuori della sua specialità - gli impulsi di raggi gamma in galassie lontane - poteva esporre la sua carriera. Zdenek Ceplecha, un autorevole studioso ceco esperto di orbite cometarie, gli ha scritto da una conferenza di specialisti che «se avessi detto loro (e me ne sono guardato bene) che la meteorite della Groenlandia aveva un'orbita così iperbolica - e quindi che non poteva in alcun modo ruotare intorno al Sole - avrebbero cominciato a ridere e non avrebbero smesso prima della fine del convegno».

Tuttavia Pedersen e Risbo hanno deciso di rischiare il ridicolo; o forse vi sono stati costretti dalla mole di dati che Pedersen ha accumulato sulla scrivania. C'è un lungo grafico che riporta l'intensità luminosa in funzione del tempo. Diversi fogli di rilevamenti effettuati da satelliti statunitensi per la difesa antimissile. Un taccuino pieno di cifre scribacchiate, brevi frasi in danese e frettolosi, rozzi diagrammi. E sullo schermo del calcolatore, l'oggetto di gran parte delle sue attenzioni negli ultimi mesi: il video di Heilmann.

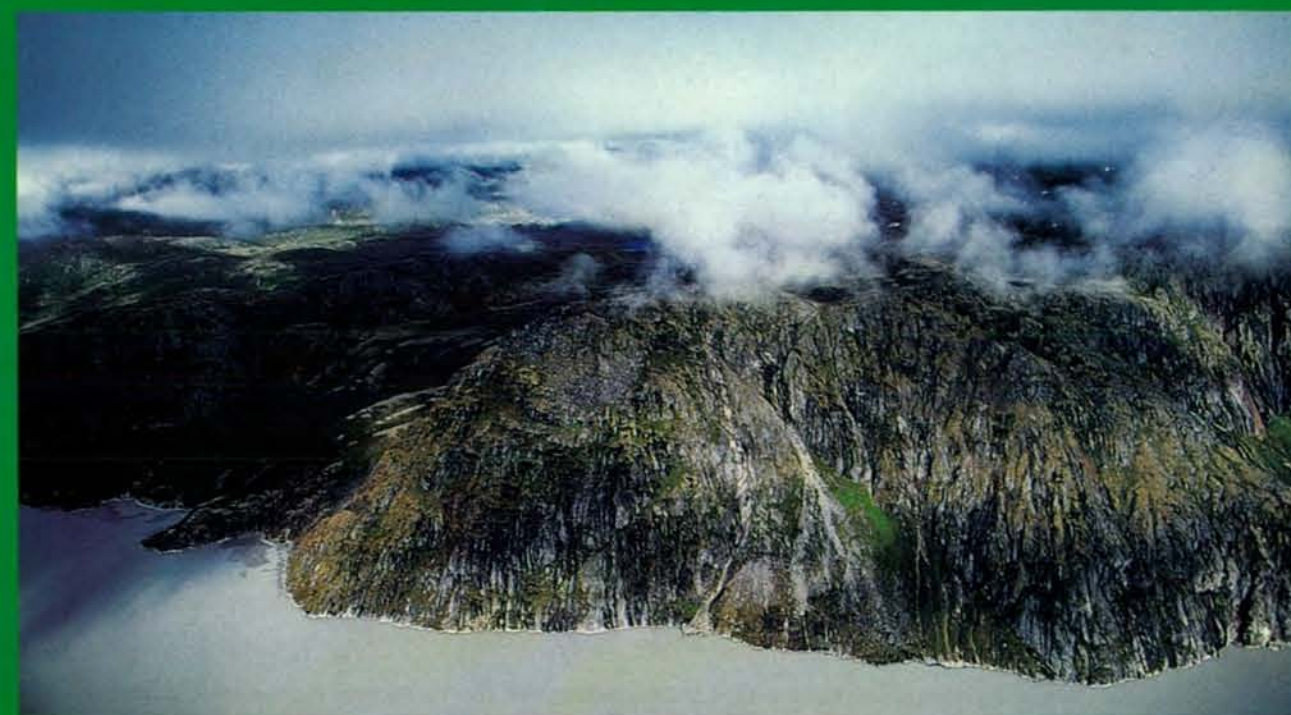
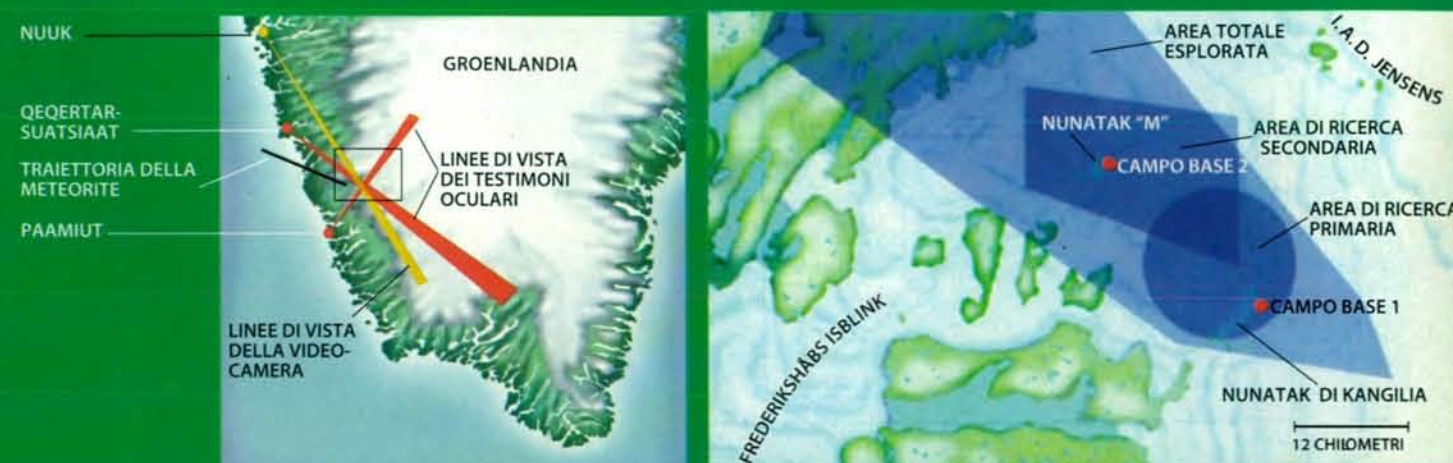
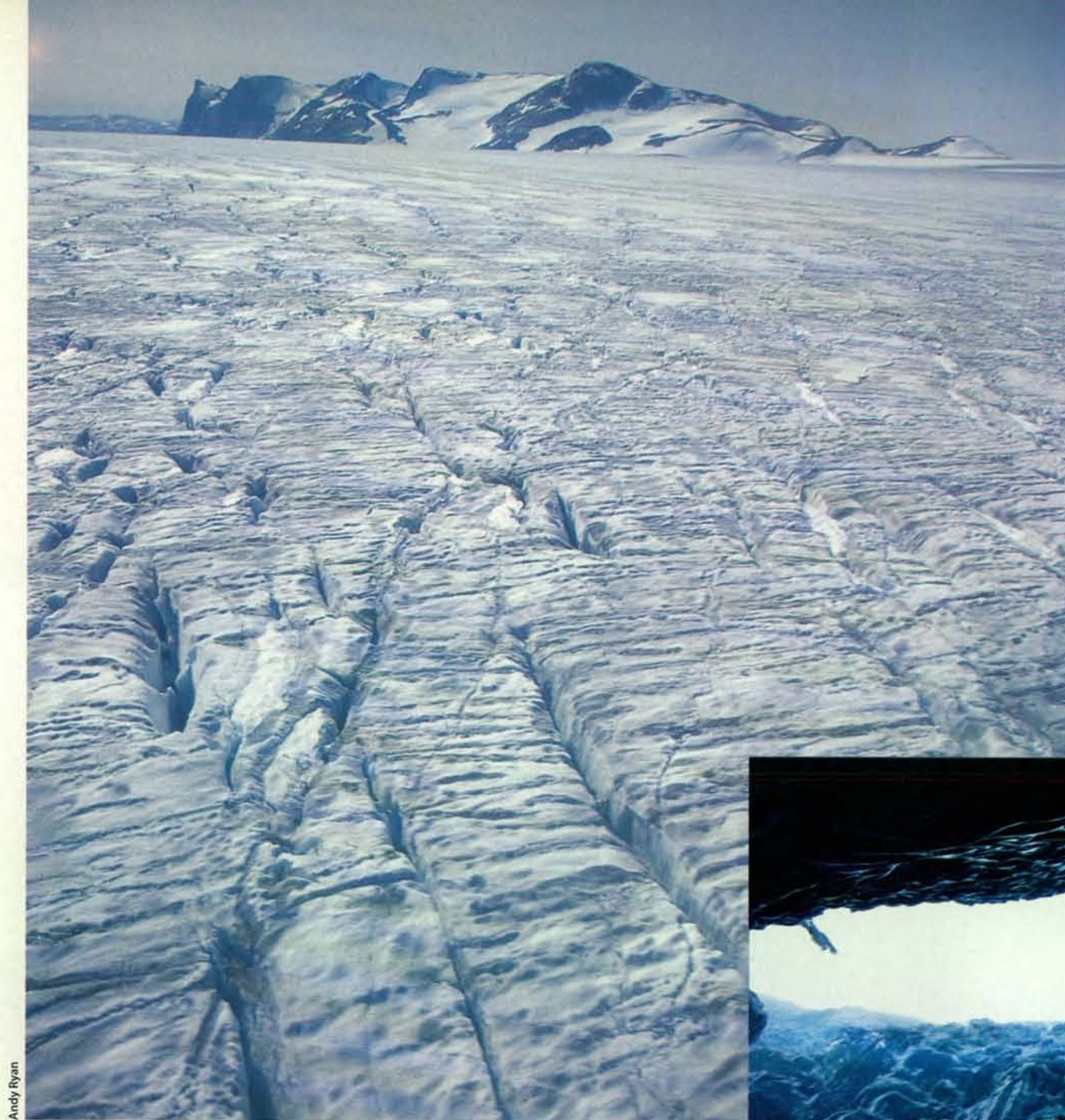
Kristian Heilmann aveva sistemato una videocamera all'interno della sua casa a Nuuk per sorvegliare la sua motoslitta durante la notte. Per un caso veramente fortunato, le sei ore di registrazione comprendevano tre secondi in cui si scorgeva la caduta della meteorite e poi, una frazione di secondo più tardi, un lampo finale appena sotto l'orizzonte.

«Questo video vale 100 volte di più di tutti i testimoni oculari» afferma Pedersen. Una registrazione è una documentazione affidabile, mentre la maggior parte degli osservatori ha descritto quello che ci si

La meteorite di Kangilia

La meteorite entrò nell'atmosfera al di sopra dell'Atlantico settentrionale nelle prime ore del mattino del 9 dicembre 1997. Mentre procedeva verso est sopra la costa sudoccidentale della Groenlandia, forse addirittura alla velocità di 56 chilometri al secondo, l'attrito atmosferico crebbe in maniera esplosiva. A una quota di oltre 24 000 metri, la palla di fuoco si spezzò in almeno quattro frammenti. «Ogni cosa è stata illuminata come dalla luce del giorno» ha riferito un marinaio di un mercantile che si trovava presso la costa rocciosa di Qeqertarsuatsiaat (*illustrata nella foto in basso a destra*).

Scienziati di Copenaghen hanno eseguito calcoli di posizione correlando le linee di vista di testimoni oculari che si trovavano in questa località e a Paamiut, un altro villaggio di pescatori, con la traiettoria di caduta registrata da una videocamera a Nuuk, la capitale dell'isola (*nella cartina di sinistra*). Ne hanno concluso che, se qualche frammento della meteorite non si era disintegrato nella caduta, doveva essere atterrato nei grandi depositi di neve presso la base del Frederikshåbs Isblink. Alla fine di luglio, dopo che gran parte della neve si era fusa esponendo la calotta glaciale sottostante, una spedizione di sette persone ha trascorso un mese in due campi base sul ghiaccio dedicandosi alla ricerca di resti della meteorite su un'area di oltre 3000 chilometri quadrati (*nella cartina di destra*).

Laurie Grace

Andy Ryan

Andy Ryan

Il ghiaccio nella zona di caduta della meteorite è spaccato da infidi crepacci larghi anche 30 metri e profondi 100. Nonostante il terreno pericoloso, il gruppo di ricerca ha percorso a piedi circa 200 chilometri. Gran parte dell'area, tuttavia, è stata ispezionata dall'elicottero.

Hans Henrik Olsen

può facilmente aspettare da qualcuno che è stato svegliato di soprassalto poco dopo le cinque del mattino dall'equivalente energetico di 64 tonnellate di tritolo che esplodevano a mezz'aria. Alcuni hanno parlato di palle di fuoco grandi quanto la Luna e luminose quasi come il Sole; altri ricordavano scie infuocate ampie due spanne.

Stabilire l'identità dell'oggetto precipitato era ovviamente l'obiettivo principale di Pedersen, ma prima bisognava rispondere a due domande più semplici: in che direzione era caduto, e a quale velocità? Se egli fosse riuscito a determinare la traiettoria esatta della palla di fuoco mentre attraversava il campo visivo della videocamera, allora avrebbe potuto ricavarne la velocità.

«Sapevamo con estrema precisione dal video di Heilmann che la meteorite procedeva su un piano inclinato di circa 47 gradi rispetto all'orizzonte; tuttavia non sapevamo in che modo si muoveva all'interno di questo piano.» Così, per due settimane di notte perpetua, in gennaio, Pedersen si trascinò dietro un teodolite mentre viaggiava da un villaggio groenlandese all'altro. Intervistò una trentina di testimoni, riempiendo il suo taccuino di schizzi, descrizioni e, cosa più importante, misurazioni esatte dell'angolo a cui ciascuno ricordava di aver visto la palla di fuoco, ottenute dal punto esatto dove il testimone si trovava al momento dell'osservazione.

Intanto negli ambienti accademici si stava rapidamente diffondendo notizia del video. Ceplecha, incuriosito, offrì spontaneamente il proprio aiuto e gli strumenti che aveva a disposizione. «Inserimmo tutte le condizioni limitanti nei suoi programmi e ottenemmo la traiettoria più probabile» spiega Pedersen. Ma questi stessi calcoli fornirono anche una velocità oltremodo improbabile: circa 56 chilometri al secondo, ossia più o meno il doppio della velocità alla quale pressoché tutte le meteoriti entrano nell'alta atmosfera; il valore era particolarmente incredibile in quanto la traiettoria di impatto era sensibilmente obliqua.

Ricostruendo all'indietro il percorso dell'oggetto, Ceplecha scoprì con sgomento che l'orbita non passava affatto nei pressi della fascia degli asteroidi, dove ha origine la maggior parte delle meteoriti. Anzi, era addirittura al di fuori del piano dell'eclittica, sicché non si poteva pensare neppure a un bizzarro effetto di fionda gravitazionale dovuto a Marte. Se le osservazioni e i calcoli erano esatti - cosa di cui Ceplecha era tutt'altro che convinto - allora l'oggetto che si era disintegrato sopra la Groenlandia doveva provenire dallo spazio profondo, ancora al di là della nube di Oort che segna il limite della zona in cui il Sole esercita la propria attrazione gravitazionale.

A questo punto, la spedizione che il Tycho Brahe Planetarium a Copenaghen aveva già cominciato a organizzare per cercare la meteorite assunse un'importanza del tutto nuova. Se Pedersen e Risbo avevano ragione, non avrebbe dovuto esservi nulla da trovare, se non polvere sparsa sulla neve. L'incredibile attrito della discesa avrebbe dovuto ridurre la meteorite in frammenti minuscoli. «Penso che il destino di questo oggetto sia stato di finire in una pioggia di materiale vaporizzato e di granuli submillimetrici» afferma Risbo. Ma i grani, sepolti da uno strato di *pukak* - neve di un anno - spesso anche un metro, potevano forse contenere la prova di un'origine extrasolare.

D'altro canto, se i cercatori fossero tornati con una roccia caduta dal cielo - e specialmente se questa fosse rientrata in una delle categorie note di meteoriti - l'ipotesi interstellare sarebbe svanita nel nulla. Solo una prova tangibile poteva chiudere la questione.

Così gli scienziati tracciarono la loro «mappa del tesoro»: un ampio cerchio che circondava il nunatak di Kangilia indicava la principale area di ricerca. Dopo aver setacciato la zona per una settimana, la spedizione non aveva ancora trovato nulla. Ma ora che finalmente gli scienziati avevano un elicottero, potevano spostarsi nell'area secondaria, una regione così remota che la pila di rocce presso il suo centro non aveva neppure un nome ufficiale. Pedersen la battezzò nunatak «M»: come meteorite.

Al mio arrivo in quest'ultimo sito, trovai Christensen piuttosto perplesso. Era appena tornato dal punto in cui era stata segnalata la presenza di crateri. «Non appena li ho visti, ho capito che non erano crateri da impatto. Il pendio è stato eroso e alcune rocce sono cadute nei vuoti. Siamo un po' delusi.» Ma sul suo viso si notava un'espressione di sollievo all'avvicinarsi dell'elicottero. Se non altro, aveva un mezzo di trasporto: dall'alto, lui e i suoi colleghi avrebbero potuto ispezionare in un'ora un'estensione maggiore di quanto fossero riusciti a coprire a piedi in due settimane.

Il mattino seguente, René Sørensen e Tore Jørgensen caricarono le

Hans Henrik Olsen

All'interno di un crepaccio il ghiaccio liscio non offre appigli. Quando uno strato di neve maschera la spaccatura, una caduta può essere inaspettata e mortale. I membri della spedizione camminavano in fila indiana, assicurati da una corda, in modo che, se uno fosse caduto, gli altri avrebbero potuto estrarlo dal crepaccio.

L'astronomo Holger Pedersen ha raccolto porta a porta le testimonianze di coloro che avevano osservato la caduta della meteorite. Correlando le interviste, il video registrato a Nuuk e dati ottenuti dai satelliti dello US Space Command, è arrivato alla straordinaria conclusione che l'oggetto fosse la prima meteorite mai osservata proveniente dallo spazio interstellare.

Andy Ryan

slitte nell'elicottero e decollarono per stabilire un campo avanzato, dove nei tre giorni successivi avrebbero raccolto una tonnellata di neve. Con il binocolo, li vedevo srotolare un telo di plastica nera e ammucchiarvi sopra palate di neve compatta. In seguito filtravano l'acqua di fusione per raccogliere eventuali solidi in traccia che fossero rimasti intrappolati nella neve da quando aveva cominciato ad accumularsi dal mese di agosto.

«Nella prima settimana, abbiamo cercato di esaminare le particelle al microscopio, per vedere se ce n'era qualcuna promettente» dice Christensen. «Il tempo era pessimo, sicché dovevamo lavorare sempre nella tenda. E nel momento in cui aprivamo i campioni, venivano inevitabilmente contaminati dai bruciatori a cherosene o da particelle organiche nell'ambiente.» I campioni raccolti sono stati allora sigillati per essere analizzati più tardi a Copenaghen, un lavoro che richiederà mesi di tempo e potrebbe essere scientificamente più impegnativo della stessa ricerca sul campo in Groenlandia (anche se certo molto meno affascinante).

Alle nove del mattino sei uomini salirono sull'elicottero. La caccia dall'alto era cominciata. Il velivolo si diresse verso sud-est, dove Ceplecha, Risbo e Pedersen avevano calcolato che dovessero essere caduti i frammenti più grandi (ammesso che fossero arrivati a terra). Il piano prevedeva la copertura di parecchie centinaia di chilometri quadrati in circa due ore, con uno schema di ricerca a reticolo: 10 chilometri in avanti, uno a destra, 10 chilometri all'indietro, uno a sinistra, e via di seguito.

Da una quota di 30 metri i membri dell'equipaggio scrutavano con estrema attenzione una fascia di 900 metri di larghezza sui due lati dell'elicottero. Anche a una velocità di 50 nodi, afferma Christensen, «se c'è qualcosa, e non è sepolto dalla neve, non possiamo fare a meno di vederlo».

Ma al suo ritorno, egli aveva con sé solo una sacca piena di sabbia untuosa, nera come ossidiana. «L'ho vista sulla superficie di una pozza di fusione. Ma è solo una crioconite.» I piccoli vortici e le pozze nei ruscelli di acqua di fusione che scorrono attraverso e sotto la copertura nevosa raccolgono polvere e alghe trascinate dalla corrente. Col tempo i depositi nerastri si sviluppano in crioconiti, pile che possono raggiungere un metro di diametro.

«Potrebbe esserci polvere della meteorite qui dentro» afferma senza troppo entusiasmo. A cena, la sera precedente, gli avevo chiesto che cosa si aspettava di trovare. «Sono totalmente obiettivo» aveva risposto. «Non ho aspettative.»

Ma per essere un uomo senza aspettative, Christensen appariva alquanto deluso al termine di una giornata estenuante. Nel pomeriggio il gruppo aveva compiuto un'altra ricognizione di 90 minuti, tornando a mani vuote. Nel terzo e ultimo volo, il velivolo era stato fatto atterrare due volte, e ogni volta la speranza di aver trovato un frammento di roccia era svanita di fronte a una pila di crioconite nera. Quella sera, Christensen era ormai pronto ad ammettere di avere un'opinione. «È una spedizione in bianco e nero: o troviamo la meteorite o non la troviamo. Al momento, riesco a vedere solo il nero.»

Una falsa pista ha portato la spedizione a indagare un avvistamento di presunti crateri da impatto lungo la costa. Ma gli avvallamenti (*chiazze bianche nella foto qui sopra*) si sono rivelati di origine erosiva. Questo indizio fasullo è stato solo uno dei guai, insieme con la nebbia che ha determinato una settimana di sosta forzata e con le infruttuose ricerche dall'elicottero, che hanno afflitto il responsabile della spedizione, l'astronomo Lars Lindberg Christensen (*qui a destra*).

Andy Ryan

Andy Ryan

L'immensità delle distese ghiacciate della Groenlandia ha fatto sì che la probabilità di rintracciare la meteorite fosse davvero minima (cosa di cui i membri della spedizione erano perfettamente consapevoli).

Il giorno seguente, al Sandia National Laboratory nel New Mexico, Ceplecha incontrò Richard E. Spalding, specialista di rilevamento a distanza. I due stavano cercando di conciliare il video di Heilmann con i dati raccolti da due satelliti dello US Space Command che avevano anch'essi registrato la fine esplosiva della meteorite.

Pedersen aveva affermato che nel video non vi era distorsione temporale, e i tecnici del Sandia erano arrivati alla stessa conclusione. «Due lampi nel video sono senza il minimo dubbio correlati con due picchi assai luminosi nelle registrazioni dei satelliti» spiega Spalding.

Quest'ultimo si rivolse allora a Edward Tagliaferri, un consulente spesso impiegato dal Pentagono per analizzare osservazioni di satelliti, soprattutto se strane. «La mia lettura dei dati dei satelliti è che i lampi indicano una velocità compresa fra 46 e 52 chilometri al secondo» dice Tagliaferri. «Non può essere la metà di questo valore. Ma è possibile che mi sbagli.» Forse, come ha proposto, due grossi frammenti, distanziati fra loro di diversi chilometri, sono esplosi a pochi millisecondi l'uno dall'altro.

Una seconda proposta di Spalding è ugualmente ipotetica. È possibile che la scia ionizzata della meteorite abbia collegato due strati carichi dell'atmosfera, come un cavo elettrico? «Un plasma di ioni accelerati avrebbe allora potuto precipitarsi verso il basso, sorpassando l'oggetto e proseguendo fragorosamente fino a depositare tutta la propria energia in un solo, gigantesco lampo. Come un fulmine, ma fatto di ioni.»

Secondo Spalding, ciò che la videocamera e i satelliti hanno visto avrebbe potuto essere un lampo di plasma che sfrecciava in avanti rispetto alla molto più lenta (e convenzionale) meteorite. È un'idea poco ortodossa, ma Ceplecha ha dichiarato, per conto suo, di essere più disposto a credere ai lampi di plasma che alle meteoriti interstellari.

Un mese dopo, all'inizio di settembre, Pedersen cominciò a sospettare che forse nessuna di queste due bizzarre spiegazioni era necessaria, perché era possibile che tutti i calcoli sulla velocità fossero sbagliati dall'inizio. Aveva appena ricevuto una nuova copia digitale del video, molto più nitida della prima: così nitida, anzi, da permettere di far corrispondere esattamente i singoli fotogrammi con i segnali delle registrazioni dei satelliti. Con questa nuova calibrazione, Pedersen ricalcolò nella maniera più accurata la traiettoria della palla di fuoco e arrivò a un risultato molto diverso da quello di Ceplecha: una velocità di 29 chilometri al secondo anziché 56, e un'origine sicuramente entro il sistema solare.

Sebbene questo nuovo modello apparisse più ragionevole, ne risultava ancora una conclusione che lasciava perplessi: se l'oggetto si muoveva a velocità normale, avrebbe dovuto diventare visibile all'inizio della sua discesa. «Quasi tutte le meteoriti cominciano a splendere fra 110 e 90 chilometri di quota» fa notare Pedersen. E tuttavia questa non ha apparentemente cominciato a riscaldarsi fino a che non ha raggiunto i 70 chilometri; questo è un dato difficile da spiegare.

Di fronte ad alternative così poco soddisfacenti, la maggior parte degli studiosi di meteoriti si arrenderebbe e si limiterebbe a notare che la meteorite di Kangilia è stata eccezionale in tutto tranne che nelle dimensioni. A meno che, naturalmente, la spedizione non tornasse con prove solide, materiali, del contrario.

Il 16 agosto la spedizione finì come era cominciata, compromessa dal capriccioso tempo atmosferico della Groenlandia. Quando la nebbia li costrinse ad abbandonare l'impresa, i membri del gruppo di ricerca avevano percorso a piedi circa 200 chilometri sotto la pioggia, il vento e la neve sull'infida coltre glaciale. Avevano accumulato oltre 1000 chilometri di volo, esplorando in 25 giorni un'area grande quanto la Valle d'Aosta in cerca di una pietra delle dimensioni di una palla da golf.

Forse sono riusciti a catturare qualche granulo di polvere di stelle nei loro campioni di neve; ma sembra più probabile che la vera natura della meteorite di Kangilia sfuggirà per sempre alla conoscenza.

La neve ha iniziato a cadere il giorno stesso della partenza del gruppo. Ben presto eventuali frammenti che giacciano nelle pozze di fusione, in fondo ai crepacci o fra le pietre delle morene glaciali saranno definitivamente sepolti, e la Groenlandia aggiungerà un altro segreto ai molti intrappolati sotto la sua calotta di ghiaccio. ❑

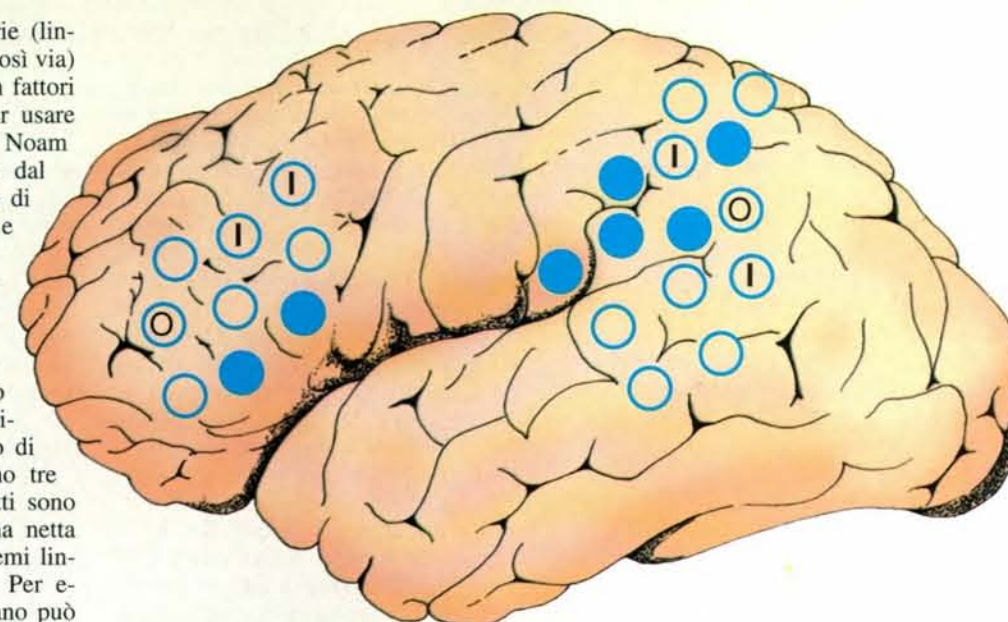
Cervello poliglotta e apprendimento delle lingue

La comprensione e l'espressione di due o più lingue utilizza aree e meccanismi cerebrali funzionalmente separati e indipendenti, alcuni dei quali maturano già prima dei sei anni d'età

di Salvatore Aglioti e Franco Fabbro

Si calcola che circa il 50 per cento della popolazione mondiale utilizzi un'altra lingua oltre a quella materna; eppure la capacità di parlare due o più lingue è stata a lungo considerata un'abilità particolare, posseduta da ristrette, e in genere colte, cerchie di individui. Questa valutazione può dipendere da almeno due ragioni. In primo luogo dal fatto che, in termini evoluzionistici, le lingue sono fenomeni che, mentre creano omogeneità di comunicazione all'interno dello stesso gruppo, fanno sorgere barriere tra gruppi diversi. Dunque, mentre la conoscenza di lingue «prestigiose» (per esempio, l'italiano nel Rinascimento, il francese nell'Ottocento o l'inglese al giorno d'oggi) è motivo di vanto, la conoscenza di una lingua ritenuta meno «importante» o parlata in comunità ostili può addirittura essere negata. In secondo luogo, i vari codici di comunicazione linguistica sono sempre stati classificati in categorie arbitrarie (lingua, dialetto, idioma, parlata e così via) che hanno a che vedere più con fattori sociopolitici che linguistici. Per usare le parole del celebre linguista Noam Chomsky, la lingua differisce dal dialetto unicamente per il fatto di «avere alle spalle una bandiera e un esercito».

Una tassonomia su base empirica suggerisce di considerare come bilingui i soggetti che comprendono e parlano due lingue - ma anche due dialetti o una lingua e un dialetto - e poliglotti coloro che sono in grado di parlare combinazioni di almeno tre lingue o dialetti. Questi soggetti sono in grado di mettere in atto una netta separazione fra i differenti sistemi linguistici da loro padroneggiati. Per esempio, un bilingue sardo-italiano può esprimersi adeguatamente solo in italiano in certe occasioni, e solo in sardo in altre, senza mescolare queste due lingue. In questo articolo, la principale distinzione viene fatta tra coloro che parlano una sola lingua e i bilingui, assimilando a questi ultimi i poliglotti per ragioni di semplicità.

Una classe della scuola elementare islamica istituita a Brent, a nord di Londra, per venire incontro alle richieste della comunità locale. Si calcola che almeno metà della popolazione mondiale debba utilizzare una seconda lingua oltre a quella materna, ma pare che solo un apprendimento molto precoce consente di padroneggiarla completamente.

Effetto della microstimolazione corticale - una tecnica che viene attuata nel corso di interventi di neurochirurgia in cui il paziente rimane vigile - sulla capacità di denominare sia nella lingua madre (l'olandese) sia nella seconda lingua nota (l'inglese) figure di oggetti. La stimolazione dei siti indicati dai cerchi pieni inibiva la denominazione in entrambe le lingue, mentre quella dei siti indicati con I e con O inibiva rispettivamente l'inglese o l'olandese. Stimolando i siti indicati con i cerchi vuoti non si otteneva alcun effetto inibitorio nei confronti di nessuna delle due lingue.

Un esperimento condotto da Stanislas Dehaene e collaboratori su soggetti sani con conoscenza scolastica di una seconda lingua ha evidenziato una diversa localizzazione dell'attivazione emisferica durante l'ascolto di storie nella lingua materna (il francese) e in quella appresa (l'inglese) in tre soggetti (indicati con un simbolo di forma e colore diversi). L'ascolto in francese attiva l'emisfero sinistro in tutti i soggetti e il destro in due soggetti su tre. Durante l'ascolto dell'inglese, un soggetto (*quadrati rossi*) presenta attività unicamente nell'emisfero destro. La grandezza dei simboli riflette l'ampiezza dei loci di attivazione.

Aree cerebrali coinvolte nell'apprendimento delle lingue

È noto che nell'uomo alcune parti del lobo temporale (area di Wernicke) e frontale (area di Broca) dell'emisfero sinistro rivestono fondamentale importanza per la comprensione e la produzione del linguaggio. Va tuttavia precisato che il linguaggio - che è una funzione cognitiva tra le più complesse - non è legato a una singola struttura, ma si basa sull'integrità di una complessa rete nervosa con importanti nodi corti-co-sottocorticali.

L'emisfero di destra, per esempio, è molto importante per gli aspetti emozionali e pragmatici del linguaggio, e forse anche per alcuni aspetti squisitamente linguistici delle lingue apprese successivamente alla lingua madre. Per chi studia le basi neurali del bilinguismo è fondamentale conoscere se la rappresentazione della lingua madre avviene tramite vie e processi che differiscono da quelli usati per la rappresentazione della seconda o di eventuali altre lingue. Informazioni rilevanti a questo proposito sono state fornite dalla tecnica di microstimolazione diretta del parenchima cerebrale nel corso di interventi neurochirurgici in cui l'apertura del cranio viene effettuata in anestesia locale.

Questa tecnica, utilizzata da un noto neurochirurgo di Seattle, George A. Ojemann, è resa possibile dal fatto che la corteccia cerebrale non possiede recettori dolorifici. Il fatto che i pazienti siano svegli e collaboranti nel corso dell'intervento consente di monitorare gli effetti di microstimolazioni erogate in un determinato punto del cervello su un compito come la produzione di parole, che il paziente deve eseguire nel corso della stimolazione. Un tale monitoraggio è fondamentale per stabilire l'importanza della struttura esaminata e decidere come intervenire su di essa. Nei soggetti bilingui, le microstimolazioni hanno consentito di identificare nella corteccia cerebrale dell'emisfero di sinistra centri comuni per le due lingue e centri la cui stimolazione inibisce in maniera differenziale solo una lingua (*si veda la figura in alto nella pagina precedente*).

L'esistenza di una sovrapposizione parziale dei substrati nervosi per L1 ed L2 e del ruolo dell'emisfero destro nella comprensione delle lingue è confermata da indagini di neuroanatomia funzionale condotte in soggetti bilingui senza patologie cerebrali. Stanislas Dehaene e collaboratori del Laboratorio di psicolinguistica del CNRS, il Consiglio nazionale delle ricerche francese, hanno esaminato mediante risonanza magnetica funzionale alcuni soggetti di madre lingua francese che avevano acquisito una discreta conoscenza scolastica dell'inglese (L2) dopo i sette anni di età. È risultato che praticamente in tutti i soggetti l'ascolto di un racconto in lingua materna induce una forte attivazione dell'emisfero sinistro e una certa attivazione dell'emisfero destro. L'ascolto di un racconto in lingua inglese ha invece suscitato risposte molto variabili nei vari soggetti, in alcuni dei quali è stata osservata solo l'attivazione dell'emisfero destro (*si veda la figura in basso nella pagina precedente*).

In un altro rilevante studio di risonanza magnetica funzionale, Karl H. Ş. Kim e collaboratori, della Cornell University di New York, hanno esaminato in soggetti multilingui - suddivisi in due gruppi in base all'età di acquisizione della seconda lingua - l'attività cerebrale in un compito che richiedeva la composizione di frasi nella lingua madre e nella seconda lingua. Mentre in entrambi i gruppi l'attivazione delle aree temporali di sinistra era del tutto paragonabile per le due lingue, l'attivazione delle aree linguistiche frontali era significativamente diversa a seconda della lingua usata nel gruppo dei bilingui «tardivi», fra quelli cioè che avevano acquisito la seconda lingua intorno agli 11 anni di età (*si veda la figura nella pagina a fronte*).

Afasia e conoscenza delle lingue

Le prime importanti informazioni sull'organizzazione cerebrale delle diverse aree responsabili delle lingue parlate sono state ottenute analizzando in soggetti capaci di parlare più lingue il tipo di recupero dei disturbi afasici indotti da lesioni cerebrali. Questo recupero, infatti, non sempre avviene in maniera parallela per le varie lingue. Martin Albert e Lorraine K. Obler dell'Università di Boston e Ruth Silverberg e Harold W. Gordon dell'Università di Gerusalemme hanno descritto tre pazienti bilingui che sembravano presentare un'afasia differenziale, cioè una diversa sindrome afasica per ogni singola lingua da loro conosciuta. Per esempio, un'afasia di Broca (caratterizzata da disturbi della produzione linguistica) in ebraico e un'afasia di Wernicke (caratterizzata da disturbi della comprensione) in inglese.

L'esistenza nello stesso paziente di due sindromi afasiche completamente diverse causate da un'unica lesione cerebrale può essere spiegata solo se si postula una netta separazione tra le modalità di rappresentazione delle due lingue. Tuttavia, secondo numerosi neurolinguisti, la stessa sindrome afasica può presentare sintomi diversi nelle due lingue sulla base delle differenze strutturali e formali delle lingue in cui si manifesta. Un paziente bilingue inglese-italiano che in seguito a un'afasia di Broca ometta patologicamente i pronomi personali commetterà molti più errori grammaticali in inglese (dove i pronomi personali sono obbligatori) rispetto all'italiano, mentre commetterà errori morfologici solo apparentemente differenti in italiano e in inglese.

In effetti, l'idea di una separazione anatomica assoluta delle rappresentazioni linguistiche è decisamente in contrasto con le recenti nozioni di riarrangiamenti dinamici nel cervello, anche adulto. È più logico pensare che sia la regolazione dell'accesso alle varie rappresentazioni a essere più o meno danneggiata da una lesione cerebrale. Questa visione trova sostegno in alcuni comportamenti linguistici, le reazioni afasiche, osservati nei pazienti bilingui: per esempio, il mescolamento patologico delle due lingue all'interno di una stessa frase (*mixing*). Nelle comunità bilingui il fenomeno del mescolamento è abbastanza frequente e certamente non patologico, ma rispetta precise regole linguistiche (per esempio i pronomi e le preposizioni non vengono espresse in una lingua diversa dal resto della frase) e sociolinguistiche (non viene mai prodotto un *mixing* se uno degli interlocutori non capisce una delle lingue usate).

Quando un soggetto bilingue diventa afasico, invece, si osserva un tipo di *mixing* che non rispetta né le regole linguistiche, né quelle sociolinguistiche, come dimostra l'esperienza che uno di noi (Franco Fabbro) ha fatto con un paziente di madrelingua slovena, seconda lingua italiana, terza lingua friulana e quarta lingua inglese. Dopo un ictus, che aveva prodotto un'estesa lesione al lobo temporale sinistro, il paziente presentava un'afasia di Wernicke in tutte le lingue che conosceva; tale afasia era associata a un quadro molto grave di *mixing* fra italiano, friulano e inglese. Qui di seguito vengono riportati alcuni esempi tratti dal colloquio tra esaminatore (E) e paziente (P).

(E) «Che lavoro faceva in Canada?»

(P) «In Canada? Co facevo la via? *I was working with ce* faccio coi... del... fare, i signori la che i faceva...»

(E) *Cemût ajal imparât l'inglês?*

(P) «*O Signor benedet!* Quando ero *cuan che jo o eri solduet jo o ai studiât inglês, o ai imparât par quindis dîs no, e o soi stât English*, mi mi ha fatto giusto un affare no, un *sublan O.K.! English* sì, *oh yeah*, Svizzera sì, Svizzera sì *fat* zingher zingher no.»

Un altro interessante fenomeno indicante la necessità di una regolazione dell'accesso ai diversi sistemi linguistici è il fenomeno dell'antagonismo alternato, descritto da Michel Paradis, della McGill University di Montreal, in un soggetto bilingue francese-inglese, divenuto afasico in seguito all'asportazione di una malformazione venosa nella regione parietale sinistra. Nella prima settimana dopo l'operazione il paziente, pur comprendendo ancora entrambe le lingue, non riusciva più a esprimersi in francese. Poiché sua moglie non capiva l'inglese, il padre doveva fungere da interprete fra i due. Nella seconda settimana il paziente recuperò il francese, ma non era più capace di esprimersi in inglese, e pertanto non riusciva più a comunicare con le infermiere dell'ospedale che conoscevano solo l'inglese.

Uno dei comportamenti verbali più caratteristici dei bilingui è la traduzione da una lingua all'altra, che può avvenire dalla seconda lingua alla lingua madre (traduzione passiva), e dalla prima lingua alla seconda (traduzione attiva). La traduzione passiva è in genere più facile di quella attiva. Negli afasici bilingui si riscontrano molto frequentemente fenomeni di alterata traduzione che fanno pensare a un problema di regolazione dell'accesso ai codici linguistici. Michel Paradis osservò che i pazienti con il fenomeno dell'antagonismo alternato erano paradossalmente in grado di tradurre verso la lingua che in quella giornata non erano in grado di parlare, ma non viceversa. Per esempio, una paziente che parlava sia arabo (la sua lingua madre) sia francese riusciva a tradurre dall'arabo al francese, ma non viceversa, proprio nei giorni in cui non era in grado di esprimersi spontaneamente in francese (antagonismo alternato). Tale traduzione era paradossale, perché possibile solo nella direzione più difficile.

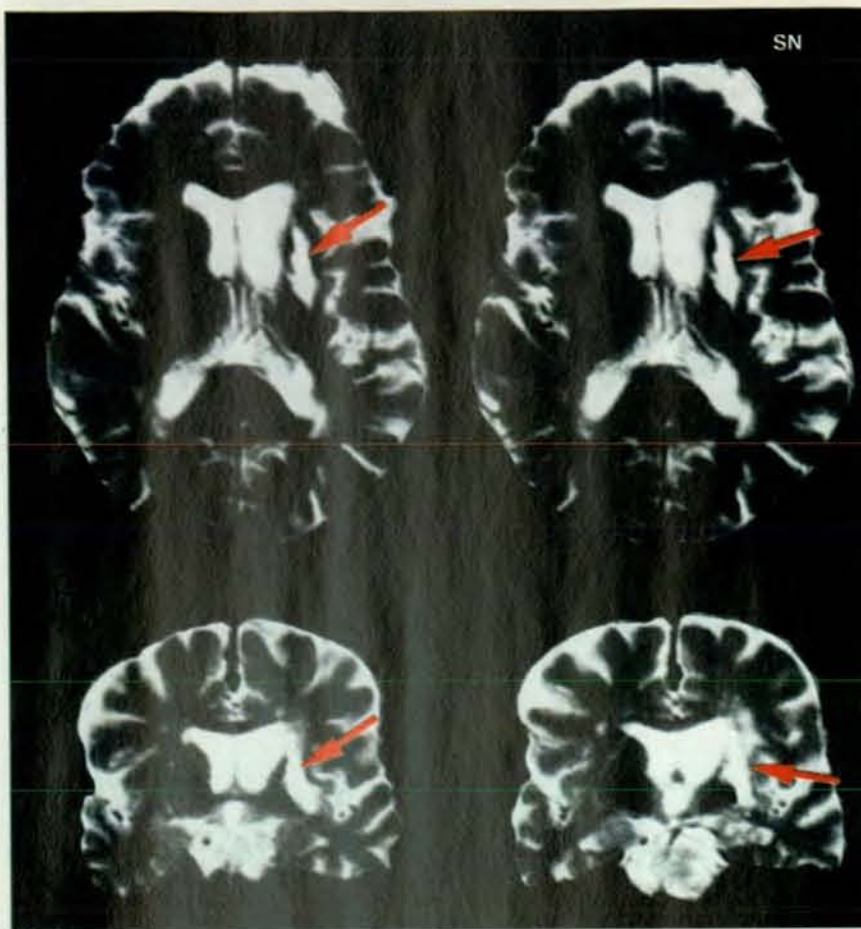
Mediante risonanza magnetica funzionale sono stati studiati gli epicentri di attivazione cerebrale (*segno* +) in sei soggetti (S1-S6) esposti alla seconda lingua dopo gli undici anni di età, durante un compito di generazione di frasi nelle due lingue conosciute. Nelle aree linguistiche frontali (rettangolo violetto in corrispondenza dell'area di Broca) i diversi epicentri di attivazione indicano una rappresentazione separata per le due lingue.

Nessuna separazione è evidente nelle aree temporali (rettangolo azzurro in corrispondenza dell'area di Wernicke). Le regioni in rosso sono attive durante l'esecuzione del compito nella lingua madre, quelle in giallo durante l'esecuzione nella seconda lingua; il colore arancione indica le regioni attivate in entrambi i compiti.

Come funziona il cervello dei bilingui

Sulla base di questi fenomeni è stata postulata l'esistenza nel cervello di una serie di componenti funzionalmente separate e indipendenti per la comprensione e l'espressione di due lingue e per la traduzione dalla lingua materna in quella appresa e viceversa. Si è infatti osservato che lesioni cerebrali diverse inibiscono specificamente alcune di queste componenti.

Abbiamo potuto osservare un recupero paradossale della seconda lingua in una donna destrimane di 70 anni la cui prima lingua era il dialetto veronese, parlato dalla nascita sia in famiglia sia in ambito lavorativo (coltivazione e vendita di ortaggi), e la seconda lingua, l'italiano standard, studiato a scuola per soli tre anni e successivamente utilizzato in maniera molto limitata. In seguito a un ictus cerebrale, la paziente, con grande stupore proprio e dei familiari, riusciva ad esprimersi esclusivamente in italiano standard, un comportamento che rendeva la comunicazione con parenti e amici del tutto innaturale. Un anno dopo la lesione la paziente è giunta alla nostra osservazione con l'esplicita richiesta di essere aiutata a recuperare il dialetto veronese, lingua per lei socialmente più importante dell'italiano. In effetti abbiamo constatato che, pur presentando alterazioni qualitative tipiche di un'afasia di Broca in entrambe le lingue, ella aveva difficoltà assai maggiori nell'esprimersi in veronese e, paradossalmente, nella traduzione dal dialetto alla lingua italiana piuttosto che nella direzione opposta.

Il comportamento linguistico di questa paziente ci ha posto notevoli problemi interpretativi sia perché la stragrande maggioranza dei pazienti afasici bilingui risulta meno danneggiata nella lingua madre (solitamente recuperata per prima rispetto alle lingue apprese successivamente), sia perché la lesione del-

Questa risonanza magnetica nucleare eseguita in una paziente dopo ictus cerebrale mostra, sia nelle sezioni trasversali *(parte alta della figura)* sia in quelle coronali *(parte bassa)*, una lesione *(frecce)* nelle parti dei gangli della base corrispondenti alla testa del nucleo caudato e al putamen di sinistra. Tali strutture, notoriamente coinvolte nel controllo motorio, sembrano svolgere un ruolo anche in alcuni compiti cognitivi.

la paziente era localizzata ai gangli della base, soprattutto al nucleo caudato e al putamen di sinistra (*si veda la figura in questa pagina*), ma non coinvolgeva le aree della corteccia cerebrale la cui lesione provoca di solito sindromi afasiche. Una possibile chiave di lettura del disturbo richiede una breve incursione nelle relazioni tra memoria e apprendimento del linguaggio e circuiti nervosi che sottostanno a queste funzioni.

Tipi di memoria e acquisizione del linguaggio

La memoria non è un sistema unitario, ma piuttosto un mosaico di sistemi. Nell'ambito della memoria a lungo termine, per esempio, si distingue la memoria dichiarativa da quella procedurale. La memoria dichiarativa comprende informazioni riguardanti specifici fatti ed episodi (memoria episodica) e conoscenze enciclopediche (memoria semantica). Le informazioni contenute in questo tipo di memoria sono accessibili all'introspezione (memoria esplicita) e possono essere verbalizzate (recupero consapevole). L'acquisizione di nuove informazioni di tipo episodico e semantico sembra legata all'ippocampo e alle porzioni mediali del lobo temporale. Una volta fissate, queste informazioni vengono depositate nelle aree corticali associative temporo-parietali.

La capacità di apprendere procedure che richiedono contemporaneamente un bagaglio di conoscenze e un'abilità motoria come, per esempio, il gioco del tennis, rappresenta un tipo di memoria che tipicamente si instaura tramite ripetizioni del compito e non richiede consapevolezza (memoria implicita). Questo meccanismo implicito è probabilmente anche alla base dell'apprendimento della lingua materna. Lo dimostra il fatto che pazienti con lesioni al sistema ippocampo-mesotemporale - che provocano amnesia anterograda (ossia incapacità a ricordare fatti successivi alla lesione) - possono acquisire implicitamente elementi grammaticali di lingue straniere non conosciute prima del danno cerebrale, mentre sono incapaci di apprendere il significato di parole nuove persino nella loro lingua materna.

Va sottolineato inoltre che anche alcune strutture sottocorticali, come i gangli della base, strettamente connesse con aree associative prefrontali svolgono un ruolo cruciale nell'acquisizione implicita di informazioni procedurali. Poiché una lesione cerebrale può colpire selettivamente solo alcuni dei sistemi mnestici sopra descritti, il recupero paradossale della seconda lingua (l'italiano) nella paziente veronese potrebbe essere dovuto a una maggiore compromissione dei sistemi della memoria implicita preposti alla prima lingua (il dialetto) e organizzati nelle strutture cerebrali profonde; invece la seconda lingua, appresa a scuola e utilizzata mediante l'applicazione di strategie consapevoli, è stata maggiormente risparmiata perché organizzata prevalentemente nei sistemi della memoria esplicita che si avvalgono soprattutto delle strutture corticali.

Come facilitare l'apprendimento delle lingue

Tra le grandi sfide poste dall'Unione Europea vi è anche quella di estendere su vasta scala l'apprendimento di più di una lingua. Al fine di impostare programmi pedagogici che ottimizzino l'educazione multilingue, è molto importante conoscere le tappe maturative e le potenzialità plastiche delle strutture cerebrali coinvolte in questo tipo di apprendimento. L'acquisizione delle diverse competenze linguistiche (fonologiche, sintattiche, lessicali) è legata alla graduale e non contemporanea maturazione dei loro substrati nervosi.

Svariati studi comportamentali dimostrano che la completa acquisizione delle componenti fonologiche sia percettive (per esempio, la discriminazione di fonemi) sia motorie (assenza di accento straniero nel parlare le lingue apprese) si raggiunge solo se i bambini vengono immersi in un ambiente in cui si parla una seconda lingua prima dei sei anni. Inoltre, è stato osservato che già dopo gli otto anni di età va progressivamente declinando la capacità di imitare la prosodia delle lingue straniere.

Christine Weber-Fox e Helene J. Neville, dell'Università di Eugene nell'Oregon, hanno esaminato le competenze sintattiche e semantiche in soggetti di madrelingua cinese immersi a varie età in un ambiente dove si parla la lingua inglese. Questi ricercatori hanno osservato che l'esposizione a questa seconda lingua intorno ai sette anni di età era già tardiva, in quanto i soggetti non riuscivano ad acquisire una completa competenza grammaticale. Se poi l'esposizione avveniva intorno ai 16 anni d'età, la competenza semantico-lessicale mostrava grosse lacune che non venivano mai colmate.

Sembra che la situazione sia un po' più favorevole quando la parentela tra la lingua materna e la seconda lingua è più stretta. Studi preliminari in soggetti che parlano sia spagnolo sia inglese indicano infatti che l'immersione nella seconda lingua intorno ai sette anni provoca alterazioni grammaticali meno gravi rispetto ai soggetti cinesi.

È interessante notare che gli aspetti fonologici e molti degli aspetti sintattici sono ben appresi, anche se in maniera del tutto inconsapevole, già intorno ai tre anni. Per contro, il patrimonio lessicale a quell'età è molto limitato. Già prima dei sei anni, le strutture nervose - gangli della base, cervelletto, aree corticali sensorio-motorie primarie e secondarie - che sono legate alla memoria implicita e che sembrano avere a che fare con fonologia e sintassi, presentano un elevato grado di maturazione. Invece le strutture legate alla memoria episodica ed enciclopedica - sistema ippocampale e aree corticali associative, soprattutto temporo-parietali - che sono probabilmente connesse agli aspetti lessicali del linguaggio, iniziano la loro maturazione più tardi e la completano solo in età adulta.

Vediamo come queste conoscenze fornite dalla neuropsicologia potrebbero dunque dimostrarsi utili per l'educazione multilingue. Nel caso delle cosiddette lingue morte (latino, greco classico) sembra che si attui una forma di apprendimento e memorizzazione esplicita delle lingue. La difficoltà di assimilarne le procedure dipende dal fatto che esse non vengono parlate, ma sono prevalentemente oggetto di traduzione verso le cosiddette lingue vive mediante l'applicazione di regole apprese consapevolmente.

Gran parte dell'insuccesso nell'insegnamento delle lingue straniere potrebbe dipendere da un'impropria applicazione alle lingue vive del modello didattico utilizzato per lo studio delle lingue morte. Siccome l'apprendimento più naturale della lingua sembra avere luogo in forma implicita, la seconda lingua ed eventualmente la terza devono essere acquisite in questa forma, magari durante attività di socializzazione o gioco. Sarebbe auspicabile che l'esposizione ad altre lingue avesse luogo entro i sei-sette anni d'età, prima che le basi nervose degli apprendimenti procedurali siano giunte a completa maturazione. È ovviamente fondamentale che il modello linguistico da imitare (insegnante, vicemadre, genitore) abbia competenza piena della lingua che vuole trasmettere, con una conoscenza fonologica, sintattica e lessicale pari a quella dei soggetti di lingua madre. I fenomeni di interferenza tra una lingua e l'altra sono ovviamente maggiori nei bilingui, ma non sembrano creare problemi diversi dai fenomeni di interferenza gergale nell'ambito di ogni singola lingua. Comunque, per limitare il mescolamento tra lingue diverse o il passaggio inappropriato da una lingua all'altra, si consiglia di «ancorare» ciascuna lingua a un ben determinato ambiente sociale, affettivo o di gioco, come mostra la figura in questa pagina.

L'apprendimento più naturale di una seconda lingua avviene in maniera inconsapevole nei bambini di età inferiore a 6-7 anni attraverso attività di socializzazione o di gioco, purché organizzate da persone che conoscano a fondo la lingua insegnata.

SALVATORE AGLIOTI insegna psicologia fisiologica presso il Dipartimento di psicologia dell'Università «La Sapienza» di Roma ed effettua attività di ricerca presso il Dipartimento di scienze neurologiche e della visione-Sezione di fisiologia umana dell'Università di Verona. Si occupa delle basi biologiche del comportamento in pazienti con lesioni cerebrali e dei meccanismi della plasticità nel cervello umano.

FRANCO FABBRO è ricercatore presso il Dipartimento di fisiologia e patologia dell'Università degli studi di Trieste, docente di neurolinguistica presso la Facoltà di medicina e chirurgia della stessa università e consulente di neurolinguistica presso l'Istituto scientifico Eugenio Medea, Associazione «La Nostra Famiglia», di Bosisio Parini (LC). Si occupa di sviluppo del linguaggio, delle basi nervose della poliglossia e della neurologia dell'interpretazione e della traduzione.

OJEMANN G. A., *Cortical Organization of Language* in «Journal of Neuroscience», 11, n. 8, pp. 2281-2287, 1991.

PARADIS M. (a cura), *Aspects of Bilingual Aphasia*, Pergamon Press, London, 1995.

AGLIOTI S., BELTRAMELLO A., GIRARDI F., FABBRO F., *Neurolinguistic and Follow-up Study of an Unusual Pattern of Recovery from Bilingual Subcortical Aphasia* in «Brain», 119, pp. 1551-1564, 1996.

FABBRO F., *The Neurolinguistics of Bilingualism*, Howe/Psychology Press, 1999.

KIM K. H. S., RELKIN N. R., LEE K. M., HIRSCH J., *Distinct Cortical Areas Associated with Native and Second Languages* in «Nature», 388, pp. 171-174, 1997.

L'evoluzione e l'origine delle malattie

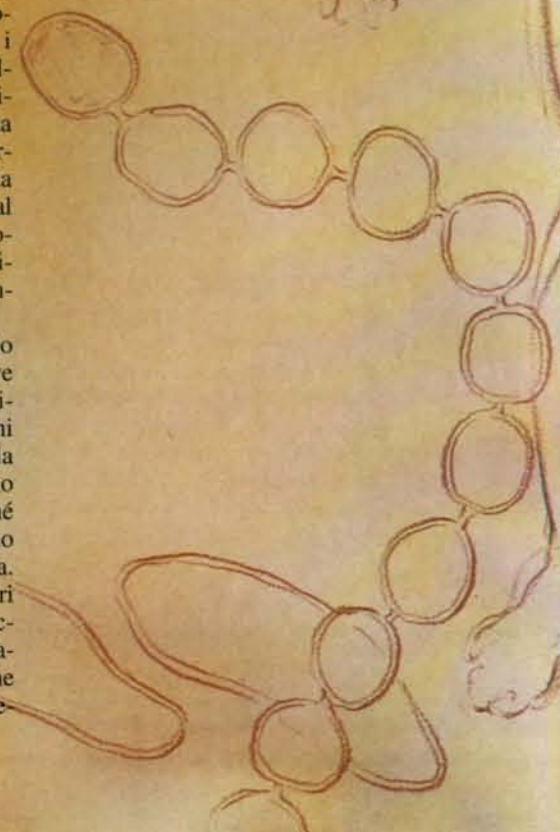
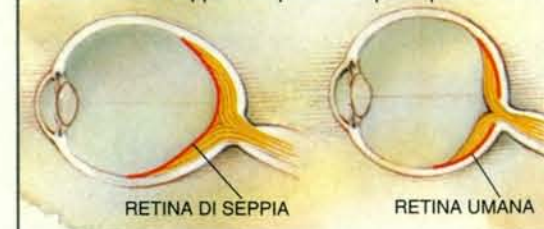
La selezione naturale costituisce un'insostituibile chiave di lettura per comprendere come insorgano molte patologie dell'organismo umano

di Randolph M. Nesse e George C. Williams

Quando contempliamo il corpo umano, rimaniamo allo stesso tempo meravigliati e perplessi. L'occhio, per esempio, ci appare come un assoluto prodigio: il tessuto trasparente della cornea si curva nel modo esatto, l'iride è in grado di adeguarsi all'intensità della luce e il cristallino alla distanza degli oggetti osservati, cosicché la giusta quantità di luce venga focalizzata esattamente sulla superficie della retina. Ben presto, però, lo stupore per questa apparente perfezione si trasforma in perplessità: contrariamente a qualunque buona regola di progettazione, i vasi sanguigni e i nervi attraversano la retina, creando un punto cieco nella zona di uscita.

Il nostro organismo presenta in effetti moltissime stridenti incongruenze. Per ogni perfetta valvola cardiaca esiste un dente del giudizio. Il nostro DNA dirige lo sviluppo dei 10 000 miliardi di cellule che formano un essere umano adulto, ma poi lascia che tutto questo si deteriori fino alla morte. Il nostro sistema immunitario è in grado di identificare e distruggere un milione di invasori diversi, ma molti batteri possono ancora ucciderci. Osservando tutte queste contraddizioni si direbbe che il nostro corpo sia stato progettato da una squadra di eccezionali ingegneri, in cui ogni tanto si sia intrufolato un mestierante pasticcione.

In realtà, le incongruenze si spiegano se studiamo attentamente l'origine dei punti deboli dell'organismo, e se teniamo a mente ciò che disse il famoso genetista Theodosius Dobzhansky: «Nulla in biologia ha senso se non alla luce dell'evoluzione». La biologia evoluzionistica è, naturalmente, la base scientifica di tutta la biologia, e a sua volta la biologia è la base su cui si fonda tutta la medicina. Con queste premesse, è sorprendente che solo adesso la biologia evoluzionistica cominci a essere considerata come una disciplina fondamentale delle scienze mediche. Lo studio dei problemi medici nel contesto dell'evoluzione prende il nome di «medicina darwiniana». Gran parte della ricerca medica è rivolta a spiegare le cause di una malattia e a mettere a punto terapie in grado di curare o alleviare le condizioni patologiche. Tradizionalmente la medicina persegue questi scopi prendendo in considerazione questioni contingenti e studiando i meccanismi fisiologici e patologici dell'organismo come se fossero sempre esistiti come tali. Al contrario, la medicina darwiniana si interroga sul perché l'organismo sia strutturato in modo tale da risultare vulnerabile, per esempio, al cancro, all'aterosclerosi, alla depressione o all'asfissia, offrendo così la possibilità di studiare le patologie in un contesto più ampio.

Possiamo classificare in un piccolo numero di categorie le ragioni evolutive dell'esistenza di imperfezioni organiche. In primo luogo, alcune condizioni spiacevoli, come il dolore, la febbre, la tosse, il vomito e l'ansia non si possono considerare vere e proprie malattie né difetti dell'organismo, ma costituiscono piuttosto evoluti meccanismi di difesa. In secondo luogo, il conflitto con altri organismi - da *Escherichia coli* al coccodrillo - è una costante nel mondo naturale. Terzo, alcune circostanze, come l'ampia disponibilità di grassi nella die-

Limiti
Esempio: la struttura dell'occhio umano crea un punto cieco e rende possibile il distacco della retina. L'occhio della seppia non presenta questi problemi.

Illustrazioni di Craig Kiefer

Difese
Esempio: sintomi come la tosse o la febbre non sono difetti, ma meccanismi di difesa dell'organismo.

Compromessi
Esempio: un sistema troppo sviluppato - come braccia estremamente robuste - sconvolgerebbe l'intero funzionamento dell'organismo.

Conflitti
Esempio: gli esseri umani sono in continua lotta contro altri organismi, che si sono evoluti in modo raffinato grazie alla selezione naturale.

Batterio del colera

CNRI/SPL/Photo Researchers, Inc.

Modificazioni dell'ambiente
Esempio: solo di recente il corpo umano si è trovato a vivere in un ambiente dove sono facilmente disponibili sostanze un tempo rare, come i cibi ad alto contenuto di grassi.

Laurie Grace

MORTE

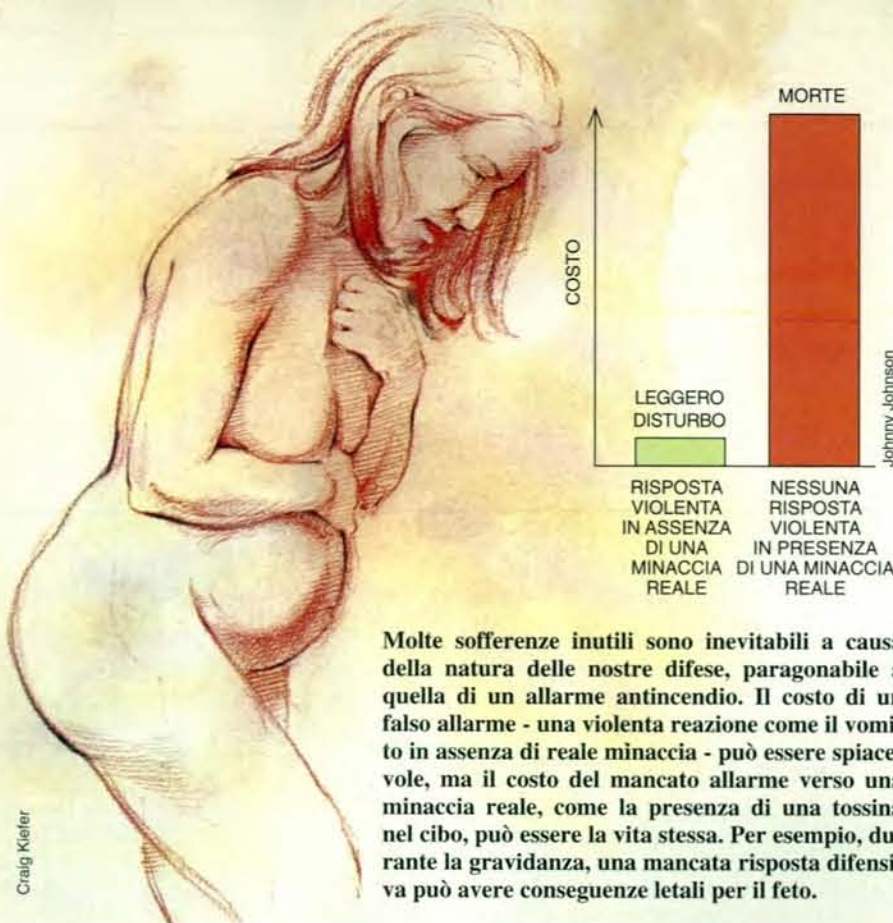
COSTO

LEGGERO DISTURBO

RISPOSTA VIOLENTA IN ASSENZA DI UNA MINACCIA REALE

NESSUNA RISPOSTA VIOLENTA IN PRESENZA DI UNA MINACCIA REALE

Johnny Johnson

Craig Kiefer

Molte sofferenze inutili sono inevitabili a causa della natura delle nostre difese, paragonabile a quella di un allarme antincendio. Il costo di un falso allarme - una violenta reazione come il vomito in assenza di reale minaccia - può essere spiacevole, ma il costo del mancato allarme verso una minaccia reale, come la presenza di una tossina nel cibo, può essere la vita stessa. Per esempio, durante la gravidanza, una mancata risposta difensiva può avere conseguenze letali per il feto.

ta, sono così recenti nella storia dell'uomo che la selezione naturale non ha ancora avuto alcuna possibilità di intervenire su di esse. Quarto, l'organismo può essere vittima del compromesso fra benefici e costi di un tratto genetico: un esempio classico riguarda il gene dell'anemia falciforme, che se da una parte causa una grave malattia, dall'altra protegge dalla malaria. Infine, i limiti intrinseci al processo di selezione naturale fanno sì che si conservino alcune caratteristiche non ottimali, come i citati difetti di progettazione dell'occhio dei mammiferi.

Difese evolute

La tosse è forse il meccanismo di difesa più facile da comprendere: chi non è in grado di espellere materiale estraneo dai polmoni, con buona probabilità morirà di polmonite. Anche la capacità di provare dolore è evidentemente vantaggiosa; i rari individui che non percepiscono il dolore possono per esempio rimanere per un tempo troppo lungo nella stessa posizione, e il ridotto afflusso di sangue agli arti può essere causa di danno fisiologico.

La tosse e il dolore, interpretati di solito come un problema patologico o traumatico, in realtà costituiscono un mezzo per risolvere il problema stesso. Si tratta di capacità difensive, plasmate dall'evoluzione, che vengono tenute in serbo dall'organismo fino a quando non si rivelano necessarie.

Comprendere l'utilità di altri meccanismi di difesa, come la febbre, la nausea, il vomito, la diarrea, l'ansia, la fatica, lo starnuto e l'infiammazione, è invece meno intuitivo. Perfino qualche medico continua a ignorare l'importanza della febbre. Lungi dall'essere un semplice aumento del tasso metabolico, la febbre è un benefico e ben controllato innalzamento del termostato naturale del corpo: l'aumento della temperatura interna facilita la distruzione degli agenti patogeni. Ricerche compiute da Matthew J. Kluger del Lovelace Institute di Albuquerque (New Mexico) mostrano che perfino animali a sangue freddo, come le lucertole, in seguito a un'infezione si spostano in zone più calde al fine di far aumentare anche di diversi gradi la propria temperatura corporea. Se a questi animali viene impedito di muoversi verso la parte più calda del terrario, il loro rischio di morte per infezione aumenta.

La riduzione dei livelli di ferro nel sangue è un altro meccanismo di difesa che spesso viene male interpretato. Le persone che soffrono di infezioni croniche spesso hanno livelli di ferro nel sangue più bassi del normale. Questa diminuzione, che viene spesso considerata come causa della malattia, ha in realtà una funzione difensiva: durante l'infezione il ferro viene sequestrato dal fegato, impedendo ai batteri di ricevere una dose adeguata di questo importante elemento.

La nausea mattutina è da sempre considerata come un effetto indesiderato della gravidanza. Tuttavia, essa coincide con il periodo in cui i tessuti del feto sono in rapida differenziazione, e in cui lo sviluppo risulta maggiormente vulnerabile all'interferenza di tossine. La nausea fa sì che la donna diminuisca il consumo di sostanze dal sapore forte, le quali potrebbero plausibilmente contenere tossine. Queste osservazioni hanno portato una ricercatrice indipendente, Margie Profet, a ipotizzare che la nausea tipica della gravidanza sia un meccanismo adattativo con cui la madre protegge il feto dall'esposizione a tossine. Per provare la sua idea, la Profet ha esaminato l'esito di numerose gravidanze, e i risultati sembrano indicare come le donne che soffrono maggiormente di nausea abbiano un'incidenza più bassa di aborti spontanei.

Un'altra condizione comune, l'ansia, è evidentemente sorta come una difesa per riuscire a evitare situazioni pericolose in natura. Uno studio condotto nel 1992 da Lee A. Dugatkin dell'Università di Louisville ha permesso di valutare gli effetti benefici della paura nei *guppy,* pesciolini di piccole dimensioni. Dugatkin ha raggruppato i pesci in tre diverse categorie - timidi, normali e coraggiosi - in funzione della loro reazione di fronte a un pesce persico. Il tipo timido si nascondeva, il normale semplicemente scappava via e il coraggioso cercava di non farsi intimidire dal pesce più grosso. Ciascun gruppo di pesciolini veniva poi lasciato in una vasca insieme con un pesce persico. Dopo 60 ore, il 40 per cento dei *guppy* timidi era sopravvissuto, rispetto al 15 per cento di quelli normali; l'intero gruppo di pesciolini coraggiosi era stato invece liquidato.

La pressione selettiva a favore dei geni che promuovono un comportamento ansioso implica anche che esistano individui troppo ansiosi, come in effetti avviene. Per la stessa ragione si suppone che esistano individui ipofobici, ossia che per qualche motivo non provano ansia a un livello sufficiente. La natura esatta e la frequenza di questa sindrome è ancora discussa, dato che è molto più difficile che qualcuno si rivolga a uno psichiatra per lamentare un insufficiente livello di ansietà.

L'utilità di condizioni comuni quanto spiacevoli, come la diarrea, la febbre e l'ansia non è intuitiva. Se la selezione naturale ha plasmato i meccanismi che regolano queste risposte difensive, come è possibile che i farmaci che bloccano queste stesse difese non provochino gravi danni all'organismo? Una risposta parziale è che in effetti a volte danneggiamo noi stessi inibendo le nostre difese.

Herbert L. DuPont dell'Università del Texas a Houston e Richard B. Hornick dell'Orlando Regional Medical Center, studiando la diarrea causata dall'infezione da *Shigella,* hanno scoperto che i pazienti che assumevano farmaci antidiarrea guarivano più lentamente ed erano più soggetti a complicazioni rispetto a chi aveva assunto un placebo. In un altro esempio, Eugene D. Weinberg dell'Università dell'Indiana ha mostrato che in certe parti dell'Africa i tentativi di correggere quella che veniva considerata una carenza di ferro hanno portato a un aumento di malattie infettive come le amebiasi. Mentre è improbabile che l'assunzione di ferro con gli integratori alimentari possa avere ripercussioni su persone altrimenti sane che hanno infezioni comuni, è invece possibile che essa causi gravi danni a individui malati e malnutriti. Queste persone infatti non producono sufficienti quantità di proteine che legano il ferro, lasciando così questo elemento a disposizione degli agenti infettivi.

Per quanto riguarda la nausea mattutina, un farmaco antinausea è stato recentemente chiamato in causa per malformazioni nei neonati. A quanto pare, non è stata presa in considerazione l'idea che il farmaco sia di per sé innocuo, ma porti a malformazioni inibendo la nausea difensiva della madre.

Un altro ostacolo che rende difficile percepire i vantaggi delle nostre difese deriva dal fatto che molti provano regolarmente e inutilmente reazioni di ansia, dolore, febbre, diarrea o nausea. Per spiegare questi effetti bisogna analizzare la regolazione delle risposte difensive in termini di rivelazione del segnale. Per esempio, con il cibo si può introdurre una tossina nello stomaco, che l'organismo può espellere con un attacco di vomito. Il costo di un falso allarme - il vomito quando in realtà non è presente una tossina - consiste in poche calorie perdute; ma il prezzo da pagare anche per un solo mancato vero allarme potrebbe essere la vita.

La selezione naturale tende perciò a sviluppare meccanismi di regolazione con una soglia di attivazione molto bassa, secondo un principio che potremmo definire «dell'allarme antincendio». Un rivelatore di fumo affidabile, in grado di svegliare una famiglia in caso di incendio, darà necessariamente un falso allarme ogni volta che si brucia un toast. Così, il prezzo che paghiamo per i nostri numerosi «allarmi antincendio» è costituito da sofferenze che sono spesso inutili, anche se non patologiche. Questo principio spiega anche perché bloccare le nostre difese spesso non porta ad alcuna tragica conseguenza. Dato che la maggior parte delle reazioni difensive avviene in risposta a minacce insignificanti, interferire con esse è di solito innocuo: la strategia di togliere la batteria a un sistema di allarme antincendio sembra ragionevole se vogliamo evitare i falsi allarmi, che sono la stragrande maggioranza. Naturalmente, non funziona se c'è un vero incendio.

Conflitti con altri organismi

La selezione naturale non ci permette di sviluppare una protezione perfetta contro tutti i patogeni, perché questi ultimi tendono a evolvere molto più velocemente di quanto non faccia la specie umana. Il batterio *E. coli,* per esempio, grazie alla sua velocità di riproduzione, in un giorno può avere altrettante opportunità di mutazione e di selezione di quante ne abbia l'umanità in un millennio. E in questo senso le nostre difese, naturali o artificiali, fungono da potenti forze selettive contro cui i patogeni devono sviluppare un contrattacco, pena l'estinzione. Paul W. Ewald dell'Amherst College ha suggerito di classificare i fenomeni associati all'infezione a seconda che siano vantaggiosi per l'ospite, il patogeno, entrambi o nessuno. Consideriamo per esempio il naso che cola a causa di un raffreddore. Le secrezioni mucose nasali possono espellere i patogeni, accelerare la loro trasmissione ad altri ospiti, o entrambe le cose (si veda l'articolo *L'evoluzione della virulenza* di Paul W. Ewald in «Le Scienze» n. 298, giugno 1993). Per distinguere fra queste ipotesi, si potrebbe esaminare con opportuni esperimenti l'effetto del blocco delle secrezioni nasali sulla durata della malattia, ma gli studi in questo senso sono molto scarsi.

L'umanità ha vinto grandi battaglie nella guerra contro i patogeni grazie ad antibiotici e vaccini. Le vittorie si susseguirono così rapidamente e in modo apparentemente così completo che nel 1969 la più alta autorità medica degli Stati Uniti, William H. Stewart, affermò che era «tempo di mettere una pietra sopra le malattie infettive». Ma il nemico, così come la forza della selezione naturale, erano stati sottovalutati. La cruda realtà è che i patogeni sono in grado di adattarsi a qualunque sostanza i ricercatori possano sviluppare. «La guerra è

L'evoluzione della virulenza

Le modificazioni della virulenza dipendono dalla storia naturale dell'agente infettivo e dalle sue modalità di trasmissione. Come ha mostrato Paul W. Ewald dell'Amherst College, quando l'infezione richiede il contatto diretto, il patogeno tende a raggiungere uno stato di bassa virulenza, perché l'ospite deve rimanere sufficientemente attivo da permettere l'interazione con gli altri. Tuttavia, la presenza di vettori intermedi che possano diffondere il patogeno, anche partendo da ospiti totalmente inabili, può causare il passaggio verso una maggiore virulenza. Anche scelte comportamentali, come per esempio pratiche sessuali più sicure, possono alterare le caratteristiche di un patogeno.

Vettori intermedi della malattia (zanzare, mani di operatori sanitari, acque contaminate). Sesso non protetto e/o promiscuo.

Trasmissione per semplice interazione fra individui (starnuto, tosse, contatto fisico). Sesso protetto e/o monogamia.

Craig Kiefer

stata vinta - ha ironizzato recentemente uno scienziato - ma dalla parte avversa.»

La resistenza agli antibiotici è una dimostrazione classica dell'effetto della selezione naturale. I batteri casualmente dotati di geni che permettono loro di prosperare anche in presenza di un antibiotico si riproducono più velocemente degli altri, sicché i geni che conferiscono la resistenza si diffondono rapidamente. Come ha dimostrato il premio Nobel Joshua Lederberg della Rockefeller University, questi geni possono perfino trasferirsi in specie diverse di batteri, trasportati da frammenti di DNA infettivo. Oggi alcuni ceppi del patogeno che causa la tubercolosi, presenti a New York, sono resistenti a tutti e tre i principali trattamenti antibiotici; i pazienti infettati da questi ceppi non hanno più possibilità di sopravvivere di quante ne avessero i malati di tubercolosi del secolo scorso. Stephen S. Morse della Columbia University ha osservato che un ceppo multiresistente che si è sviluppato sulla costa orientale degli Stati Uniti potrebbe aver avuto origine in un ricovero per senzatetto che si trova di fronte al Columbia-Presbyterian Medical Center. Un fenomeno del genere sarebbe effettivamente prevedibile in un ambiente dove la feroce pressione selettiva spazza via i ceppi di patogeni meno resistenti. I microrganismi superstiti si sono affermati proprio grazie alla loro resistenza.

Molti, fra cui anche alcuni medici e scienziati, credono ancora alla teoria superata secondo cui i patogeni diventano necessariamente più benigni dopo una lunga associazione con l'ospite. A un'analisi superficiale, la cosa sembra avere senso. Un organismo che uccide troppo rapidamente l'ospite rischia di non raggiungerne mai un secondo, cosicché la selezione naturale sembrerebbe favorire una minore virulenza. La sifilide, per esempio, era una malattia molto virulenta alla sua prima apparizione in Europa, ma con il passare dei secoli è diventata progressivamente più lieve. La virulenza di un patogeno, tuttavia, è una caratteristica che nel corso del tempo può aumentare o diminuire, a seconda di quale opzione sia più vantaggiosa per i suoi geni.

Per i patogeni che si diffondono direttamente da una persona all'altra, una bassa virulenza è generalmente vantaggiosa perché permette all'ospite di restare attivo e assicura al patogeno la possibilità di entrare in contatto con altri potenziali ospiti. Tuttavia alcune malattie, come la malaria, vengono trasmesse altrettanto bene - o anche meglio - se l'ospite è inabile. Quindi, per i patogeni che in genere si avvalgono di un vettore intermedio, come la zanzara, un'alta virulenza può costituire un vantaggio selettivo. Questo principio ha dirette implicazioni nel controllo delle infezioni ospedaliere, dove le mani del personale sanitario possono funzionare da vettori che portano alla selezione di ceppi più virulenti.

Nel caso del colera, l'acqua assume lo stesso ruolo della zanzara. Quando l'acqua che viene usata per bere o per lavarsi è contaminata da scarichi di individui inabilitati a muoversi, la selezione porta a un incremento della virulenza, perché una diarrea più forte provoca una maggiore diffusione dell'organismo, anche se i singoli ospiti muoiono rapidamente. Tuttavia, come ha dimostrato Ewald, quando le condizioni igienico-sanitarie migliorano, la selezione agisce contro il batterio *Vibrio cholerae*, favorendo il suo biotipo più benigno El Tor. In queste condizioni, un ospite morto rappresenta un vicolo cieco per il patogeno; al contrario, un ospite mobile, in grado di infettare molti altri per lungo tempo, costituisce un veicolo efficace per un patogeno a virulenza più bassa. In un altro esempio, il miglioramento delle condizioni igieniche ha portato alla sostituzione dell'aggressiva *Shigella flexneri* con la più benigna *S. sonnei*.

Queste considerazioni potrebbero essere rilevanti per la sanità pubblica. Le teorie di tipo evolutivo prevedono che l'uso di siringhe non contaminate e le pratiche sessuali sicure, oltre a preservare direttamente numerosi individui dall'infezione da HIV, avranno anche un effetto meno immediato. Se il comportamento stesso dell'uomo riuscirà a rallentare la velocità di trasmissione dell'HIV, i ceppi che non uccidono rapidamente i loro ospiti avranno un vantaggio selettivo a lungo termine rispetto a quelli più virulenti, che tenderanno a morire assieme ai loro ospiti senza avere occasione di diffondersi. Le nostre scelte collettive, quindi, possono cambiare la natura stessa dell'HIV.

I conflitti con gli altri organismi non sono limitati ai patogeni. In tempi passati, i nostri simili erano continuamente sotto la minaccia di predatori in cerca di cibo. Oggi, tranne rari casi, i grandi carnivori non costituiscono più una minaccia per l'uomo; un pericolo maggiore è rappresentato dalle difese messe in atto da piccoli organismi, come il veleno dei serpenti e dei ragni. Ironicamente, la nostra paura verso i piccoli animali, che si manifesta sotto forma di fobie, probabilmente causa più danni di quanti ne provochi l'interazione diretta con questi organismi. Di gran lunga più pericolosi dei predatori o degli animali velenosi sono i membri della nostra stessa specie, che possono aggredire non per cibo, ma per procurarsi un partner, o difendere il territorio o altre risorse. I conflitti violenti fra individui sono incredibilmente frequenti nella competizione fra giovani maschi e portano alla nascita di organizzazioni atte a perseguire questi scopi: gli eserciti, composti perlopiù da giovani maschi, perseguono obiettivi simili, con un costo altissimo.

Perfino la più intima delle relazioni umane dà luogo a conflitti che possono avere implicazioni mediche. Per esempio, gli interessi riproduttivi della madre e del figlio possono sembrare identici in un primo tempo, ma poi divergono velocemente. Come notava il biologo Robert L. Trivers in un articolo ormai classico del 1974, quando il bambino ha già qualche anno, il miglior modo con cui la madre potrebbe servire i propri interessi riproduttivi sarebbe quello di iniziare una nuova gravidanza, mentre per i figli risulterebbe più vantaggioso se la madre continuasse ad allattarli. Perfino nel ventre materno esiste un conflitto di interessi. Dal punto di vista materno, la grandezza ottimale del feto è un poco inferiore a quella che invece sarebbe ideale per il feto stesso e per il padre. Questa sorta di discordia, secondo David Haig della Harvard University, dà origine a una «corsa agli armamenti» fra il feto e la madre, che riguarda i valori della pressione sanguigna o i livelli ematici di zucchero di quest'ultima, e che a volte provoca ipertensione e diabete.

Un nuovo ambiente comporta nuovi rischi per la salute

Le più comuni minacce per la salute dal 20 000 a.C. all'epoca moderna:

Incidenti

Fame

Predazione

Malattie infettive

Le più comuni minacce per la salute oggi (nelle società tecnologicamente avanzate)

Infarto, ictus e altre complicazioni dell'aterosclerosi

Cancro

Altre malattie croniche associate alle abitudini di vita e alla longevità

Diabete non insulino-dipendente

Obesità

Nuove malattie infettive

Far fronte alle novità

Una visita in un moderno ospedale serve a dare l'idea di quante malattie l'umanità abbia provocato a se stessa. L'infarto del miocardio, per esempio, è soprattutto conseguenza dell'aterosclerosi, un problema che si è manifestato in modo diffuso solo durante questo secolo, e che rimane tuttora raro fra i popoli di cacciatori-raccoglitori. La ricerca epidemiologica fornice le informazioni che dovrebbero aiutarci a prevenire l'infarto: limitare il consumo di grassi, mangiare molte verdure, ed effettuare regolare attività fisica. Nonostante tutto ciò sia ben noto, sono in molti a seguire uno stile di vita esattamente opposto. Negli Stati Uniti un terzo della popolazione è in sovrappeso e tale frazione sta crescendo. Perché così tante persone perseverano nel danneggiare la propria salute?

Bisogna pensare come il cervello si sia evoluto in vista dell'adattamento a un ambiente completamente diverso da quello attuale. Nella savana africana, dove le caratteristiche dell'uomo moderno presero forma, i grassi, gli zuccheri e il sale erano scarsi e preziosi. Gli individui che avevano la tendenza a consumare grandi quantità di grassi quando se ne presentava l'occasione beneficiavano di un vantaggio selettivo: era più probabile che questi individui sopravvivessero alle carestie. Di conseguenza noi - che di quegli uomini siamo i discendenti - abbiamo ereditato il desiderio di consumare cibi che oggi sono tutt'altro che rari. Questi desideri, accesi dall'evoluzione e ben attizzati dalla pubblicità, hanno facilmente la meglio sui nostri buoni propositi.

Tentazioni ancor più pericolose sono procurate del resto dalla sempre più ampia disponibilità di sostanze psicoattive - principalmente alcool, tabacco e droghe - responsabili di molte malattie, di enormi spese sanitarie e di morti premature. Molte sostanze, come la nicotina, la cocaina e gli alcaloidi del papavero da oppio, sono frutto della selezione naturale e hanno la funzione di proteggere le piante dall'attacco di insetti. E dato che l'uomo e gli insetti condividono le stesse basi evolutive, questi composti hanno un effetto anche sul nostro sistema nervoso.

È probabile che l'aumento rapido e relativamente recente del numero di tumori del seno sia il risultato di mutamenti dell'ambiente e dello stile di vita, e la presenza di anomalie genetiche spiegherebbe solo un piccolo numero di casi. Boyd Eaton e colleghi della Emory University hanno osservato che, anche oggi, l'incidenza di tumori del seno nelle società cosiddette «primitive» è molto più bassa rispetto a quella dei paesi industrializzati. Essi hanno ipotizzato che l'intervallo di tempo compreso fra le prime mestruazioni e la gravidanza costituisca un fattore di rischio importante, così come il numero di cicli mestruali nel corso della vita. Nelle società di cacciatori-raccoglitori, le prime mestruazioni avvengono intorno ai 15 anni o più tardi, seguite entro pochi anni dalla gravidanza e da due o tre anni di allattamento, a cui fa seguito un'altra gravidanza. Le mestruazioni, quindi, si verificano solo nel periodo fra la fine dell'allattamento e la gravidanza successiva, il che limita il periodo in cui si hanno elevati livelli di ormoni che potrebbero danneggiare le cellule del seno.

Nelle società moderne, invece, le adolescenti hanno le prime mestruazioni all'età di 12-13 anni - forse grazie anche al notevole arricchimento in grassi della dieta - mentre la prima gravidanza può verificarsi dopo decenni, o può anche non verificarsi affatto. In una società di cacciatori-raccoglitori una donna può avere un totale di circa 150 cicli mestruali, mentre la media nelle società moderne è di 400 cicli o più. Anche se ovviamente non si può consigliare alle donne di generare un figlio prima dei vent'anni allo scopo di prevenire il cancro del seno, è possibile che un trattamento ormonale tale da simulare la gravidanza riduca il rischio di questa patologia. All'Università della California a San Diego si stanno attualmente conducendo ricerche epidemiologiche per verificare questa possibilità.

Compromessi e limiti

Qualsiasi forma di adattamento comporta compromessi. Se le ossa del braccio umano fossero tre volte più spesse di quanto sono, le fratture sarebbero quasi inesistenti, ma *Homo sapiens* sarebbe un essere rozzo e sgraziato costretto a una dieta molto ricca di calcio. Orecchi più sensibili ci sarebbero utili in molte situazioni, ma saremmo continuamente afflitti da rumori di intensità minima.

Equilibri di questo tipo esistono anche a livello genetico. Se una mutazione offre un vantaggio riproduttivo, la sua frequenza nella popolazione tenderà ad aumentare, anche se comporta maggiore vulnerabilità a una malattia. Per esempio, coloro che possiedono due copie del gene per l'anemia falciforme soffrono di una grave malattia che provoca una morte precoce, mentre coloro che possiedono due copie «normali» del gene sono suscettibili alla malaria. Ma gli individui che hanno una copia di ciascun gene sono protetti sia dalla malaria sia dall'anemia falciforme. Nelle zone in cui la malaria è diffusa, questi individui sono meglio adattati - in senso darwiniano - rispetto ai membri degli altri due gruppi. Perciò, anche se il gene per l'anemia falciforme è causa di una grave malattia, la sua presenza è favorita nelle zone malariche. Qual è la versione «sana» del gene in questo ambiente? Non esiste risposta a questa domanda, perché non esistono geni «normali» nell'uomo.

Si presume che molti altri geni che causano malattie offrano anche un vantaggio selettivo, almeno in certi ambienti; altrimenti non sarebbero così comuni. Il gene responsabile della fibrosi cistica, una malattia che uccide un individuo di razza caucasica su 2500, dovrebbe tendere a essere eliminato dalla selezione naturale, mentre di fatto si conserva. Già da qualche anno si sospettava che il gene della fibrosi cistica conferisse un vantaggio di qualche tipo ai suoi portatori; recentemente uno studio di Gerald B. Pier e colleghi della Harvard Medical School ha prodotto una prova a conferma di questa ipotesi: possedere una copia del gene della fibrosi cistica, infatti, sembra diminuire le probabilità di contrarre una febbre tifoide che un tempo comportava una mortalità del 15 per cento.

Craig Kiefer

L'appendice cecale è probabilmente destinata a mantenersi nell'apparato digerente, nonostante la sua palese inutilità. La pressione selettiva infatti penalizza le appendici di piccole dimensioni (*in alto*), dato che in esse le infiammazioni, con le tumefazioni che ne conseguono, hanno esiti più pericolosi. Perciò la selezione agisce favorendo la persistenza di appendici relativamente più voluminose.

L'invecchiamento potrebbe essere il miglior esempio di compromesso genetico. Nel 1957 uno di noi (Williams) ipotizzò che i geni che causano l'invecchiamento e la morte potessero comunque essere favoriti dalla selezione naturale qualora avessero altri effetti vantaggiosi per gli individui più giovani, quelli cioè che sono maggiormente sottoposti a pressione selettiva. Per esempio, un ipotetico gene in grado di regolare il metabolismo del calcio in modo tale da accelerare la riparazione di fratture ossee ma anche da produrre la calcificazione delle pareti delle arterie, potrebbe risultare favorito pur costituendo un fattore di mortalità negli individui anziani. L'influenza di questi geni pleiotropici (cioè dotati di effetti multipli) è stata osservata nel moscerino della frutta e nel tribolio della farina, ma nessun esempio specifico è stato ancora rivelato nell'uomo. La gotta, però, è un caso particolarmente interessante, perché ha origine quando un potente antiossidante, l'acido urico, forma cristalli che precipitano provocando depositi nelle articolazioni. Gli antiossidanti hanno l'effetto di ritardare l'invecchiamento, e i livelli plasmatici di acido urico in diverse specie di primati sono strettamente correlati con la vita media degli adulti. È possibile che alti livelli di acido urico siano vantaggiosi per la maggior parte degli esseri umani, perché rallentano l'invecchiamento dei tessuti; alcuni individui, però, pagano il prezzo di questo beneficio soffrendo di gotta.

Altri esempi riguardano meccanismi che probabilmente contribuiscono ad accelerare l'invecchiamento. Per esempio, energiche difese immunitarie ci proteggono dalle infezioni, ma causano piccoli e continui danni ai tessuti. È anche possibile, naturalmente, che la maggior parte dei geni che causano l'invecchiamento non porti benefici in alcuna fase della vita; in natura, questi geni potrebbero semplicemente non avere sulla capacità riproduttiva effetti tali da essere eliminati per selezione naturale. Comunque sia, nel prossimo decennio le ricerche permetteranno sicuramente di identificare specifici geni che accelerano la senescenza, e si avrà così la possibilità di interferire con la loro azione, o perfino di modificarli direttamente. Prima di intervenire, dovremo però capire se la funzione di questi geni non abbia benefici negli individui più giovani.

Dato che l'evoluzione procede solo lungo la freccia del tempo, il piano costruttivo di un organismo è limitato dalle strutture che già esistono. Come si è detto, l'occhio dei vertebrati è costruito in modo da inviare le proprie proiezioni verso l'interno. L'occhio della seppia, invece, non presenta questo difetto, dato che nervi e vasi sanguigni scorrono all'esterno della retina, penetrando dove è necessario e fissando la retina stessa in modo da impedirne il distacco. I difetti costruttivi dell'occhio umano derivano unicamente dalla cattiva sorte: milioni di anni fa lo strato di cellule che nei nostri antenati era sensibile alla luce era casualmente posizionato in modo diverso dallo strato corrispondente della seppia. I due modelli si sono evoluti lungo linee separate e non c'è modo di tornare indietro.

Questo meccanismo spiega anche perché il semplice atto della deglutizione possa essere pericoloso. Le nostre vie respiratorie e digestive si intersecano perché in un antichissimo nostro antenato appartenente ai pesci polmonati l'apertura che permetteva l'entrata dell'aria per respirare in superficie era localizzata nella parte superiore del muso e si apriva in uno spazio condiviso con la via digestiva.

Il percorso della selezione naturale può perfino portare a «binari morti» come l'appendice cecale, ultimo vestigio di una cavità che i nostri antenati utilizzavano per la digestione. Dato che l'appendice non svolge più la sua funzione originaria, e considerato che la sua infiammazione può avere esiti letali, ci si domanda come mai la selezione naturale non l'abbia già eliminata. La realtà è alquanto più complessa di quanto non appaia a prima vista. L'appendicite si verifica quando l'infiammazione causa una tumefazione, la quale comprime l'arteria che alimenta l'appendice stessa. Il flusso di sangue ha un effetto protettivo nei confronti della crescita batterica, e la sua riduzione favorisce l'infezione, la quale a sua volta provoca maggiore tumefazione. Se l'afflusso di sangue si interrompe del tutto, i batteri regnano sovrani finché l'appendice degenera completamente. Un'appendice piccola è molto più esposta a una successione di eventi di questo tipo, per cui - paradossalmente - è il fenomeno stesso dell'appendicite a creare una pressione selettiva tale da mantenere nell'organismo umano un'appendice di dimensioni relativamente grandi. Lungi dall'affermare che tutto nell'organismo è perfetto, un'analisi di tipo evolutivo svela che conviviamo con alcune spiacevoli caratteristiche ereditate dai nostri predecessori, e che alcuni nostri punti deboli possono in realtà essere attivamente mantenuti dalla pressione selettiva.

L'evoluzione della medicina darwiniana

Nonostante l'immenso impatto delle teorie darwiniane, solo di recente la biologia evoluzionistica ha cominciato a essere considerata come una scienza di base necessaria allo studio della medicina. La maggior parte delle malattie riduce la capacità adattativa, e per questo si immagina che la selezione naturale debba determinare lo stato di salute, non le condizioni patologiche. L'approccio di tipo darwiniano ha senso solo se si cerca di spiegare non le malattie, ma piuttosto i tratti che ci rendono vulnerabili a esse. Anche l'idea che la selezione naturale massimizzi la salute è errata: la selezione naturale favorisce il successo riproduttivo dei geni. Quei geni che permettono a un organismo di avere un mag-

Alcuni princìpi della medicina darwiniana

L'approccio darwiniano porta a nuove prospettive per la pratica medica.
I principi seguenti sono una base per considerare la salute e la malattia in un contesto evolutivo:

Le difese evolutive e i «difetti» fisiologici sono due manifestazioni fondamentalmente diverse della malattia.

Bloccare le difese comporta costi e benefici.

Dato che la selezione naturale tende a creare meccanismi di difesa secondo il principio dell'allarme antincendio, molte manifestazioni di difesa portano a sofferenze inutili per l'individuo.

Le epidemie moderne sono probabilmente causate dallo squilibrio fra la costituzione fisiologica del nostro organismo e le nuove caratteristiche dell'ambiente in cui viviamo.

I nostri impulsi naturali, che nell'ambiente ancestrale portavano l'uomo a compiere azioni che rendevano massimo il successo riproduttivo, ora possono provocare malattie e morte precoce.

Il corpo è un insieme di compromessi.

Non esiste un corpo «normale».

Non esiste un patrimonio genetico umano «normale».

Alcuni geni che causano malattie possono anche portare benefici; altri possono causare malattie solo in seguito all'interazione con nuovi fattori ambientali.

La sopravvivenza dei geni indirizza le azioni di un individuo, anche a spese della salute e della longevità dello stesso individuo che li possiede.

La virulenza di un patogeno è una caratteristica che può aumentare o diminuire.

I sintomi di un'infezione possono risultare utili al patogeno, all'ospite o a nessuno dei due.
La malattia è un evento inevitabile a causa del modo in cui gli organismi vengono plasmati dall'evoluzione.

Per ciascuna malattia è necessario trovare una spiegazione contingente sul perché alcune persone si ammalano e altre no, e una spiegazione evolutiva sul perché i membri di una specie sono vulnerabili a essa.

Le malattie non sono una conseguenza della selezione naturale, ma molti punti deboli che rendono vulnerabili alle malattie lo sono.

L'invecchiamento è meglio spiegabile come un compromesso piuttosto che come una malattia.

Specifiche raccomandazioni cliniche si devono basare su studi clinici; gli approcci basati solo sulla teoria non hanno base scientifica e possono essere causa di danni.

giore successo riproduttivo si diffonderanno di più, pur compromettendo alla lunga la salute dell'individuo.

In definitiva, situazioni storiche e malintesi hanno ostacolato l'accettazione della medicina darwiniana. Un approccio di tipo evolutivo all'analisi funzionale può essere interpretato come un'ingenua concezione teleologica o vitalista, un malinteso che solo di recente, e con grandi sforzi, è stato eliminato dal pensiero medico. E, naturalmente, ogniqualvolta la medicina e l'evoluzione vengono associate, si affaccia lo spettro dell'eugenetica.

Le scoperte, attraverso la visione darwiniana, di come tutti gli esseri umani siano simili nella loro vulnerabilità alla malattia offriranno grandi benefici ai singoli, ma questo non significa necessariamente che possiamo o dobbiamo tentare di migliorare la nostra specie. Semmai, questo approccio ci rende consapevoli del fatto che apparenti difetti genetici potrebbero avere un significato adattativo, che non esiste un singolo patrimonio genetico «normale» e che la stessa nozione di «normalità» tende a essere troppo semplicistica. L'applicazione sistematica della biologia evoluzionistica alla medicina rappresenta una nuova strada. In mancanza di adeguati finanziamenti, però, ci vorranno decenni prima che questo campo di studio possa maturare. La creazione di Dipartimenti di biologia evoluzionistica all'interno delle Facoltà di medicina potrebbe accelerare questo processo, ma finora pochi centri di questo genere hanno visto la luce.

Il punto di vista evolutivo, che ci mostra la profonda connessione esistente fra il funzionamento normale dell'organismo e la malattia, può riuscire a integrare diverse aree della ricerca medica e può suggerire nuovi e importanti settori su cui indagare. Per la sua utilità e il suo impatto, la biologia evoluzionistica è inevitabilmente destinata al riconoscimento di campo fondamentale della ricerca medica.

RANDOLPH M. NESSE e GEORGE C. WILLIAMS sono gli autori del libro, pubblicato nel 1994, *Why We Get Sick: The New Science of Darwinian Medicine*. Nesse si è laureato in medicina all'Università del Michigan nel 1974. È attualmente professore di psichiatria nella stessa istituzione e direttore dell'Evolution and Human Adaptation Program dell'Institute for Social Research della stessa università. Williams ha ottenuto il dottorato nel 1955 all'Università della California a Los Angeles, ed è presto divenuto uno dei più famosi teorici evoluzionisti a livello mondiale. È membro della National Academy of Sciences, professore emerito di ecologia ed evoluzione alla State University of New York a Stony Brook, e direttore di «Quarterly Review of Biology».

EWALD P. W., *Evolution of Infectious Disease*, Oxford University Press, 1994.

McGUIRE M. T. e TROISI A., *Darwinian Psychiatry*, Harvard University Press, 1998.

STEARNS S. (a cura), *Evolution in Health and Disease*, Oxford University Press, 1998.

TREVATHAN W. R. e altri, *Evolutionary Medicine*, Oxford University Press (in stampa).

Deficit di attenzione e iperattività

Secondo una nuova teoria, questo disturbo del comportamento può insorgere quando importanti circuiti cerebrali non si sviluppano correttamente, forse a causa della disfunzione di uno o più geni

di Russell A. Barkley

Yan Nascimbene

I bambini affetti da ADHD non riescono a controllare le loro risposte all'ambiente. Questa mancanza di controllo li rende iperattivi, disattenti e impulsivi.

Osservando nella mia sala d'attesa Keith, un bambino di cinque anni, mi apparve chiaro perché i suoi genitori dicessero che aveva tanti problemi alla scuola materna. Prima si mise a saltare da una sedia all'altra, agitando freneticamente le braccia e le gambe, poi iniziò ad armeggiare con gli interruttori, accendendo e spegnendo le luci, con grande fastidio di tutti, e continuando a parlare senza interruzione. Quando sua madre lo invitò a raggiungere un gruppo di altri bambini che si trovavano nella stanza dei giochi, Keith si intromise in un gioco in corso e ne assunse la guida, finché gli altri bambini, lamentandosi perché voleva fare il capo, passarono ad altre attività. Anche quando aveva a disposizione completa alcuni giochi, Keith li manipolava senza posa e sembrava del tutto incapace di divertirsi tranquillamente. Dopo un esame più completo, i miei sospetti iniziali trovarono conferma: Keith soffriva del disturbo legato a un deficit di attenzione e a iperattività (*attention-deficit hyperactivity disorder* o ADHD, una sigla usata anche in Italia).

A partire dagli anni quaranta, gli psichiatri hanno utilizzato molti nomi diversi per definire i bambini caratterizzati da iperattività e da una disattenzione e impulsività fuori della norma. Questi soggetti sono stati considerati affetti da minima disfunzione cerebrale, da sindrome infantile da lesione cerebrale, da reazione ipercinetica dell'infanzia, da sindrome da iperattività infantile e, più recentemente, da disturbo dell'attenzione. I frequenti cambiamenti nelle definizioni rispecchiano l'incertezza dei ricercatori sulle cause del disturbo, e perfino su quali siano esattamente i criteri diagnostici.

Ormai da diversi anni, però, i ricercatori che si occupano di ADHD hanno iniziato a metterne in luce sintomi e cause, e hanno trovato che il disturbo può avere una determinante genetica. Attualmente, le teorie in proposito sono molto diverse da quelle che andavano per la maggiore anche solo pochi anni fa. Stiamo chiarendo che l'ADHD non è un disturbo dell'attenzione in sé, come si era a lungo ritenuto, ma nasce da un difetto evolutivo nei circuiti cerebrali che stanno alla base dell'inibizione e dell'autocontrollo. A sua volta, questa mancanza di autocontrollo pregiudica altre importanti funzioni cerebrali necessarie per il mantenimento dell'attenzione, tra cui la capacità di posticipare le gratificazioni immediate in vista di un successivo e maggiore vantaggio.

L'ADHD comporta due gruppi di sintomi: disattenzione e una combinazione di comportamenti iperattivi e impulsivi (*si veda il riquadro nella pagina successiva*). Per la maggior parte, i bambini sono più attivi, più facili alla distrazione e più impulsivi delle persone adulte. E sono anche più incoerenti e influenzati dagli eventi passeggeri e da tutto quanto li circonda. Più i bambini sono piccoli, meno sono consapevoli del tempo o capaci di dare priorità a eventi futuri rispetto ai desideri immediati. Questi comportamenti, tuttavia, stanno a indicare un problema quando i bambini li manifestano in misura significativamente maggiore rispetto ai loro coetanei.

I maschi hanno una probabilità di manifestare il disturbo almeno tripla rispetto alle femmine; da alcuni studi, anzi, emerge che i bambini con ADHD sono in proporzione di nove a uno rispetto alle bambine, forse perché i maschi sono geneticamente più soggetti alle malattie del sistema nervoso. Gli schemi comportamentali tipici dell'ADHD insorgono in genere a un'età compresa fra i tre e i cinque anni. Ci possono essere, però, ampie variazioni: in certi casi i sintomi compaiono solo nella tarda infanzia o addirittura agli inizi dell'adolescenza. Le ragioni di questa comparsa tardiva dei sintomi rimangono oscure.

I soggetti colpiti sono numerosissimi in tutto il mondo. Molti studi valutano che sia affetto da ADHD tra il 2 e il 9,5 per cento dei bambini in età scolare; il disturbo è stato identificato dai ricercatori in tutte le nazioni e in tutte le culture studiate. Contrariamente a quanto si riteneva un tempo, inoltre, la condizione può persistere in età adulta. Per esempio, circa due terzi dei 158 bambini analizzati da me e dai miei colleghi negli anni settanta erano ancora affetti dal disturbo tra i venti e i trent'anni. E molti di quelli che non rientravano più nella descrizione clinica dell'ADHD avevano ancora significativi problemi di adattamento nel lavoro, a scuola o in altri contesti sociali.

Per poter aiutare i bambini (e gli adulti) colpiti da ADHD, gli psichiatri e gli psicologi devono capire meglio le cause del disturbo. Essendo stato tradizionalmente considerato un problema relativo all'attenzione, alcuni ricercatori hanno proposto per l'ADHD una spiegazione in termini di incapacità a filtrare stimoli sensoriali competitivi, come quelli visivi e quelli sonori. Recentemente, tuttavia, alcuni studiosi guidati da Joseph A. Sergeant dell'Università di Amsterdam hanno dimostrato che i bambini affetti da ADHD non presentano difficoltà in quel campo; piuttosto, non sono capaci di controllare le risposte motorie impulsive a quegli stimoli. Altri ricercatori hanno scoperto che i bambini con ADHD hanno una minore capacità di preparare in anticipo le risposte motorie agli eventi e hanno difficoltà a modificare il proprio comportamento in seguito agli errori compiuti in quelle risposte. Per esempio, in un diffuso test dei tempi di reazione che prevede la pressione di un particolare pulsante tra tanti al momento in cui si accende una luce d'allarme, i bambini affetti da ADHD sono meno abili degli altri a tenersi pronti all'azione. Inoltre, dopo aver compiuto errori in queste prove, non rallentano per migliorare la propria precisione.

In cerca di una causa

Nessuno conosce le cause dirette e immediate delle difficoltà incontrate dai bambini affetti da ADHD, ma i progressi nelle tecniche di indagine neurologica e nella genetica fanno sperare che si possa arrivare a chiarire la questione entro i prossimi cinque anni. Disponiamo già di alcune informazioni, che però non si inseriscono ancora in un quadro coerente.

Negli ultimi dieci anni, alcuni studi fondati sulle moderne tecniche di elaborazione di immagini hanno indicato quali potrebbero essere le regioni cerebrali il cui cattivo funzionamento spiegherebbe i sintomi dell'ADHD. Stando a quei lavori, sembrerebbero coinvolti la corteccia prefrontale, parte del cervelletto e almeno due gangli basali, ammassi di cellule nervose situati nelle profondità del cervello (*si veda l'illustrazione a pagina 73*). In uno studio del 1996, F. Xavier Castellanos, Judith L. Rapoport e i loro colleghi del National Institute of Mental Health hanno scoperto che la corteccia prefrontale destra e due gangli basali, il nucleo caudato e il globo pallido, sono significativamente meno estesi del normale nei bambini affetti da ADHD. Agli inizi del 1998, il gruppo di Castellanos ha trovato che, in questi bambini, anche il verme del cervelletto è di dimensioni inferiori alla norma.

Le informazioni fornite dalle immagini sono significative perché le aree cerebrali di dimensioni ridotte nei soggetti affetti da ADHD sono proprio quelle che regolano l'attenzione. La corteccia prefrontale destra, per esempio, è coinvolta nella programmazione del comportamento, nella resistenza al-

Come si diagnostica l'ADHD

Gli psichiatri diagnosticano un disturbo dell'attenzione associato a iperattività se il soggetto esaminato mostra sei o più dei seguenti sintomi di disattenzione, oppure sei o più sintomi di iperattività e impulsività. Le manifestazioni, di un grado inadeguato e incoerente con il livello evolutivo della persona, devono ricorrere frequentemente ed essere presenti per almeno sei mesi. Inoltre, alcuni dei sintomi devono essere stati pregiudizievoli prima dei sette anni e devono attualmente esserlo in almeno due situazioni. Alcuni devono anche portare a una significativa diminuzione dell'inserimento sociale o del rendimento scolastico od occupazionale; nessuno dovrebbe essere esclusivamente riferibile a un altro disturbo. (Adattato dalla quarta edizione di *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders.* © 1994 American Psychiatric Association.)

DISATTENZIONE

- Non presta attenzione ai dettagli o è impreciso nei compiti scolastici, nel lavoro o in altre attività
- Ha difficoltà a mantenere l'attenzione durante i compiti o il gioco
- Sembra che non ascolti quando gli si parla
- Non segue fino in fondo le istruzioni e non riesce a completare i compiti di scuola, i piccoli lavori in casa o le incombenze di lavoro
- Ha difficoltà a organizzare i compiti e le attività
- Evita o affronta malvolentieri i compiti o le attività che richiedono uno sforzo mentale (come le ricerche per la scuola)
- Non ha gli strumenti che gli servono per i compiti o le attività (testo dei compiti, penne, colori, libri, righelli eccetera)
- È facilmente distratto da stimoli esterni
- È smemorato nelle attività quotidiane

IPERATTIVITÀ E IMPULSIVITÀ

- Agita nervosamente le mani o i piedi oppure si dimena sulla sedia
- Lascia il proprio posto in aula o in altre situazioni in cui è previsto che rimanga seduto
- Corre o si agita eccessivamente in situazioni in cui questo comportamento è inopportuno (adolescenti o adulti che danno una sensazione soggettiva di irrequietezza)
- Ha difficoltà a impegnarsi tranquillamente in attività di svago
- È sempre in movimento o agisce come se fosse «spinto da un motore»
- Parla eccessivamente
- Dà risposte a vanvera prima che siano state completate le domande
- Ha difficoltà ad aspettare il proprio turno
- Interrompe o interferisce con gli altri

le distrazioni e nello sviluppo della consapevolezza di sé e del tempo. Il nucleo caudato e il globo pallido agiscono interrompendo le risposte automatiche per consentire una decisione più accurata da parte della corteccia e per coordinare gli impulsi che attraverso i neuroni raggiungono le diverse regioni della corteccia. L'esatto ruolo del verme del cervelletto non è stato ancora chiarito, ma indagini recenti fanno ritenere che abbia a che fare con l'essere più o meno motivati.

Da che cosa deriva la ridotta dimensione di queste strutture cerebrali nei soggetti affetti da ADHD? Nessuno lo sa, ma molti studi sembrano avvalorare l'ipotesi che il fenomeno possa essere dovuto a una disfunzione di alcuni dei numerosi geni che normalmente sono attivi durante la formazione e lo sviluppo della corteccia prefrontale e dei gangli basali. La maggior parte dei ricercatori pensa attualmente che l'ADHD sia un disturbo poligenico, ossia determinato dal concorso di più geni.

Le prime indicazioni sull'origine genetica dell'ADHD sono venute da ricerche condotte sulle famiglie dei bambini affetti dal disturbo. Per esempio, si è osservato che i fratelli e le sorelle di bambini con ADHD hanno una probabilità di sviluppare la sindrome da cinque a sette volte superiore a quella dei bambini appartenenti a famiglie non colpite. E i figli di un genitore affetto da ADHD hanno fino a cinquanta probabilità su cento di sperimentare le stesse difficoltà.

La prova più conclusiva del contributo genetico all'ADHD, però, viene dallo studio sui gemelli. Nel 1992, Jacquelyn J. Gillis, allora all'Università del Colorado, e i suoi colleghi scoprirono che il rischio di ADHD in un gemello monozigote di un bambino affetto dal disturbo è tra 11 e 18 volte superiore a quello di un fratello non gemello di un bambino con ADHD; si valuta che tra il 55 e il 92 per cento di gemelli monozigoti di bambini affetti da ADHD finisca con lo sviluppare la sindrome.

Uno dei più ampi studi sull'ADHD relativo a gemelli fu condotto da Helene Gjone e Jon M. Sundet dell'Università di Oslo insieme con Jim Stevenson dell'Università di Southampton in Inghilterra. Coinvolgeva 526 gemelli monozigoti, che ereditano esattamente gli stessi geni, e 389 gemelli eterozigoti, la cui somiglianza genetica è analoga a quella di fratelli nati ad anni di distanza. Il gruppo di ricerca scoprì che l'ADHD è ereditario quasi all'80 per cento, cioè che circa l'80 per cento delle differenze nell'attenzione, nell'iperattività e nell'impulsività tra persone affette da ADHD e persone sane può essere spiegato da fattori genetici.

F. Xavier Castellanos e Jay N. Giedd, National Institute of Mental Health

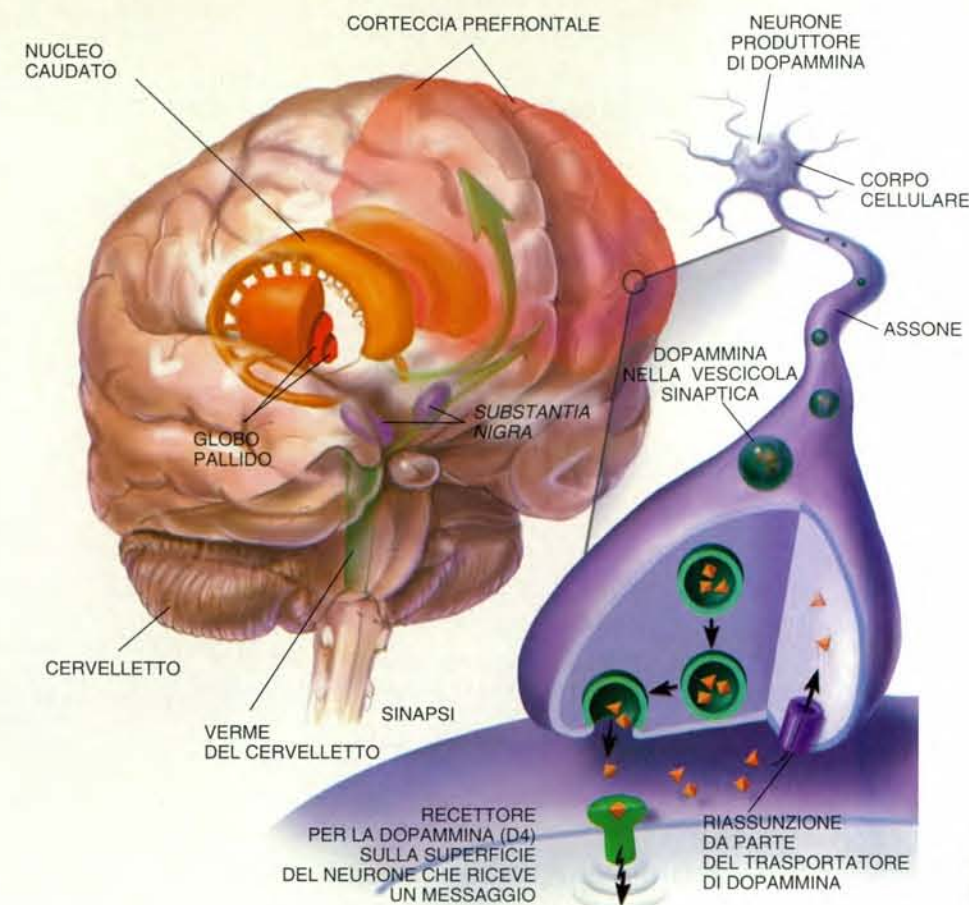
In questo cervello di un soggetto normale sono stati evidenziati il nucleo caudato destro (*in giallo*) e il globo pallido (*in rosso*), due strutture cerebrali che regolano l'attenzione e che si presentano di dimensioni più ridotte della norma negli individui affetti da ADHD.

Terese Winslow

Le strutture cerebrali colpite nell'ADHD utilizzano la dopammina per comunicare l'una con l'altra (*frecce verdi*). Alcuni studi di genetica fanno ritenere che le persone affette da ADHD potrebbero avere alterazioni nei geni che codificano per il recettore della dopammina D4, che riceve i segnali in ingresso, o per il trasportatore della dopammina, che elimina la dopammina rilasciata per un successivo reimpiego. La *substantia nigra* - la regione del cervello in cui la morte dei neuroni produttori di dopammina provoca il morbo di Parkinson - non è coinvolta nell'ADHD.

I fattori non genetici che sono stati collegati all'ADHD includono la nascita prematura, l'uso di alcool e tabacco da parte della madre, l'esposizione a elevate quantità di piombo nella prima infanzia e le lesioni cerebrali - soprattutto quelle che coinvolgono la corteccia prefrontale. Presi insieme, tuttavia, questi fattori possono spiegare dal 20 al 30 per cento dei casi di ADHD tra i maschi, e ancora di meno tra le femmine. (Contrariamente alla convinzione popolare, non si è trovata alcuna significativa correlazione tra ADHD e metodi educativi o fattori dietetici, come la quantità di zucchero consumata dai bambini.)

Quali sono i geni difettosi? Forse quelli che determinano il modo in cui il cervello utilizza la dopammina, una sostanza che agisce da neurotrasmettitore, trasportando segnali chimici da una cellula nervosa, o neurone, a un'altra. La dopammina è secreta dai neuroni in particolari zone del cervello per inibire o modulare l'attività di altri neuroni, in particolare di quelli coinvolti nell'emozione e nel movimento. I disturbi del movimento nel morbo di Parkinson, per esempio, sono provocati dalla morte di neuroni produttori di dopammina in una formazione del cervello, la *substantia nigra*, che si trova al di sotto dei gangli basali.

Alcuni studi molto convincenti mettono in particolare evidenza il ruolo svolto dai geni che impartiscono le istruzioni per la produzione dei recettori e dei trasmettitori della dopammina; questi geni sono molto attivi nella corteccia prefrontale e nei gangli basali. I recettori della dopammina si trovano sulla superficie di alcuni neuroni. La dopammina trasporta il suo messaggio a questi neuroni legandosi ai recettori. I trasportatori di dopammina si protendono dai neuroni che secernono il neurotrasmettitore e recuperano la dopammina inutilizzata in modo che possa essere usata di nuovo. Mutazioni nel gene per il recettore della dopammina possono rendere i recettori meno sensibili alla dopammina. Al contrario, mutazioni nel gene per il trasportatore della dopammina possono rendere eccessivamente attivi i trasportatori, facendo in modo che essi eliminino la dopammina secreta prima che essa abbia la possibilità di legarsi agli specifici recettori situati su un neurone adiacente.

Nel 1995, Edwin H. Cook e i suoi colleghi dell'Università di Chicago resero noto che i bambini affetti da ADHD avevano una maggiore probabilità di presentare una particolare variante del gene per il trasportatore di dopammina DAT1. Analogamente, nel 1996, Gerald J. LaHoste dell'Università della California a Irvine e i suoi collaboratori osservarono che nei bambini affetti da ADHD era particolarmente abbondante una variante del gene per il recettore di dopammina D4. Ciascuno di questi studi, però, era stato svolto su un campione relativamente limitato (non più di 40 o 50 bambini) e quindi i risultati appena esposti devono essere confermati da studi di maggiori proporzioni.

Dai geni al comportamento

In che modo i difetti genetici e di struttura cerebrale osservati nei bambini affetti da ADHD portano ai comportamenti caratteristici del disturbo dell'attenzione associato a iperattività? In definitiva, si potrebbe affermare che essi agiscono riducendo la capacità di inibire comportamenti inadeguati e di autocontrollarsi, il che, a mio giudizio, è il deficit centrale nell'ADHD.

L'autocontrollo - ossia la capacità di inibire o di posporre le immediate risposte motorie (e forse emotive) a un evento - è fondamentale per l'esecuzione di qualsiasi compito. Crescendo, la maggior parte dei bambini matura la capacità di impegnarsi in attività mentali, le funzioni esecutive, che li aiutano a vincere le distrazioni, a ricordare gli obiettivi e a compiere i passi necessari per raggiungerli. Per conseguire un obiettivo nel lavoro o nel gioco, per esempio, bisogna essere in grado di ri-

Un modello psicologico dell'ADHD

Una mancanza di inibizione comportamentale e di autocontrollo porta ai seguenti disturbi:

FUNZIONE DANNEGGIATA	CONSEGUENZA	ESEMPIO
Memoria di lavoro non verbale	Diminuzione del senso del tempo Incapacità di tenere a mente gli eventi Riduzione della capacità di retrospezione Riduzione della capacità di previsione	Marco, un bambino di nove anni, dimentica regolarmente importanti impegni, come il termine massimo per consegnare la relazione su un libro o la convocazione dal direttore della scuola
Interiorizzazione del discorso autodiretto	Carenze nel comportamento regolato Difficoltà nell'autoregolarsi e nel porsi domande	Giovanna, una bambina di cinque anni, parla troppo e non riesce a darsi in silenzio istruzioni utili su come realizzare un compito
Autoregolazione dell'umore, della motivazione e del livello di attenzione	Esibisce pubblicamente tutte le emozioni; non sa operare censure Ridotta autoregolazione degli impulsi e delle motivazioni	Andrea, un bambino di otto anni, non riesce a concentrarsi in modo da leggere fino in fondo un racconto adeguato alla sua età e non sa nascondere la rabbia quando si sente frustrato per i compiti scolastici che gli sono stati assegnati
Ricostituzione (capacità di scomporre i comportamenti osservati nelle loro componenti, che possono essere ricombinate in nuovi comportamenti tesi a uno scopo)	Limitata capacità di analizzare i comportamenti e di elaborarne di nuovi Incapacità di risolvere i problemi	Luca, un ragazzo di quattordici anni, smette di fare un compito a casa quando si rende conto di avere solo due delle cinque domande assegnate; non pensa a un modo per risolvere il problema, come chiamare un amico per farsi dare le domande mancanti

cordare lo scopo (retrospezione), di chiarirsi ciò che serve per raggiungere quell'obiettivo (previsione), di tenere a freno le emozioni e di motivarsi. Se una persona non riesce a evitare l'interferenza di pensieri e impulsi, nessuna di queste funzioni può essere portata a termine con successo.

Nei primi anni, le funzioni esecutive sono svolte in modo esterno: avviene che i bambini parlino tra sé ad alta voce richiamando alla mente un compito o interrogandosi su un problema. Via via che maturano, i bambini imparano a interiorizzare, a rendere private, le funzioni esecutive, impedendo ad altri di conoscere i loro pensieri. I soggetti con ADHD, invece, appaiono privi del freno necessario per inibire l'esecuzione davanti a tutti delle funzioni esecutive. Queste ultime possono essere raggruppate in quattro attività mentali. Una è l'operazione connessa alla memoria di lavoro, ossia il tenere a mente le informazioni mentre si lavora a un certo compito, anche se non si è più in presenza dello stimolo originario che ha fornito l'informazione. Questa memoria è di fondamentale importanza per la tempestività e il comportamento orientato allo scopo: fornisce i mezzi per la retrospezione, la previsione, la preparazione e la capacità di imitare un nuovo e complesso comportamento degli altri: tutte attività menomate nei soggetti affetti da ADHD.

L'interiorizzazione del discorso autodiretto è un'altra funzione esecutiva. Prima dei sei anni, la maggior parte dei bambini parla spesso ad alta voce tra sé, per esempio cercando di ricordare il modo per eseguire un certo compito o cercando di risolvere un problema («Dove ho messo quel libro? Oh, l'ho lasciato sotto il banco»). Nella scuola elementare, questo comportamento si trasforma via via in un mormorio inavvertibile e di solito scompare intorno ai 10 anni (si veda l'articolo *Why Children Talk to Themselves* di Laura E. Berk in «Scientific American», novembre 1994).

Il discorso autodiretto interiorizzato consente di riflettere su se stessi, di seguire regole e istruzioni, di usare l'autointerrogazione per risolvere problemi e costruire «meta-regole» (sistemi per capire le regole in modo da poterle adoperare) rapidamente e senza coinvolgere altri. Nel 1991, Laura E. Berk e i suoi colleghi della Illinois State University trovarono che l'interiorizzazione del discorso autodiretto avviene in ritardo nei bambini affetti da ADHD.

Una terza funzione esecutiva consiste nel controllare le emozioni, la motivazione e lo stato di attenzione. Questo controllo aiuta gli individui a raggiungere gli obiettivi, mettendoli in grado di posporre o modificare le reazioni subitanee a un evento potenzialmente distraente, a tenere per sé le emozioni e a porsi degli obiettivi. Coloro che sanno porre un freno alle loro reazioni immediate vengono anche accettati più facilmente nella società.

L'ultima funzione esecutiva, la ricostituzione, racchiude in realtà due processi distinti: la scomposizione di comportamenti osservati nelle loro componenti e la loro ricombinazione in nuove azioni che non fanno parte del proprio bagaglio di esperienze. Quest'ultima funzione fornisce agli esseri umani un grado elevato di destrezza, flessibilità e creatività; consente agli individui di proiettarsi verso un obiettivo senza dover imparare a memoria tutti i passi necessari. Permette ai bambini, via via che maturano, di tenere sotto controllo il proprio comportamento su intervalli sempre più lunghi, pianificando i comportamenti in modo da raggiungere lo scopo prefissato. Alcuni studi preliminari fanno ritenere che i bambini con ADHD siano meno capaci di ricostituzione degli altri bambini.

Ritengo che, come il discorso autodiretto, anche le altre tre funzioni esecutive vengano interiorizzate nel corso dell'evoluzione del sistema nervoso centrale che si verifica durante la prima infanzia. Questa interiorizzazione è essenziale per formare l'immaginazione visiva e il pensiero verbale. Crescendo, i bambini sviluppano la capacità di avere comportamenti segreti, di mascherare agli occhi altrui alcuni dei loro pensieri e sentimenti. Forse a causa di un difetto genetico o dello sviluppo embrionale, i bambini affetti da ADHD non raggiungono questa capacità ed eccedono quindi nelle verbalizzazioni e nel manifestare i propri comportamenti. Secondo me, la disattenzione, l'iperattività e l'impulsività di questi bambini sono provocate dall'incapacità di farsi guidare da istruzioni interne e di controllare i propri comportamenti.

Insegnare l'autocontrollo

Se, come ho sottolineato, l'ADHD è un'inibizione deficitaria del comportamento che ritarda la comparsa della capacità di interiorizzare ed eseguire le quattro funzioni mentali che ho descritto, i bambini affetti da questo disturbo potrebbero essere aiutati da un ambiente più strutturato. Una struttura ben organizzata può essere un importante complemento a qualsiasi terapia farmacologica i bambini possano ricevere. Negli Stati Uniti ai bambini (e agli adulti) affetti da ADHD si usa somministrare farmaci che aumentano la capacità di inibire e regolare i comportamenti impulsivi. Questi farmaci agiscono inibendo i trasportatori di dopammina e quindi aumentando il tempo a disposizione della dopammina per legarsi ai recettori presenti su altri neuroni.

Questi prodotti (che, a dispetto dei loro effetti inibitori, sono noti come psicostimolanti) hanno mostrato di poter migliorare il comportamento nel 70-90 per cento dei bambini affetti da ADHD di età superiore ai cinque anni. I bambini con ADHD che assumono questi farmaci sono non solo meno impulsivi, irrequieti e distraibili, ma anche più capaci di tenere a mente informazioni importanti, di avere migliori risultati a scuola, e inoltre di avere un discorso più interiorizzato e un maggiore autocontrollo. Il risultato è che tendono a essere apprezzati di più dagli altri bambini e devono subire meno punizioni per le loro azioni, il che contribuisce a migliorare l'immagine di sé.

Il modello del disturbo che ho messo a punto suggerisce che, oltre agli psicostimolanti, e forse per alcuni bambini agli antidepressivi, il trattamento dell'ADHD dovrebbe includere corsi per genitori e docenti in modo da insegnare loro nuovi e più efficaci metodi per affrontare i problemi comportamentali: per esempio, rendere più frequenti e immediate le conseguenze dell'azione di un bambino e aumentare l'impiego di stimoli e suggerimenti per apprendere le regole e il senso del tempo. Genitori e insegnanti devono aiutare i bambini affetti da ADHD anticipando gli eventi al posto loro, scomponendo i compiti futuri in passi più piccoli e più immediati, e offrendo piccoli premi e incentivi. Tutti questi passi servono a rendere comprensibili il tempo, le regole e le conseguenze delle azioni in modo da contrastare la debolezza del re-

Che cosa può fare la scuola italiana per aiutare i ragazzi con disturbi di attenzione e iperattività

L'esperienza insegna che, se si pone un alunno che presenti questo tipo di disturbo di fronte a compiti che richiedono pianificazione e controllo di diverse operazioni, nel 90 per cento dei casi andrà incontro a un fallimento, con un elevato rischio di accumulare le difficoltà. Spesso inoltre la nostra scuola tende ancora ad attribuire gli scarsi risultati e le intemperanze a mancanza di volontà o li associa alla personalità o a scarsa educazione da parte della famiglia. Per queste ragioni oggi si ritiene che sia importante informare gli insegnanti su questo tipo di disturbo in modo da responsabilizzarli e coinvolgerli nel trattamento dell'alunno.

Una ricerca (pubblicata in «Psicologia e Scuola» n. 83) condotta di recente nel nostro paese da Emanuela Sironi e Mario Frinco su 620 bambini di scuola elementare ha dimostrato che effettivamente il bambino affetto da disturbo d'attenzione e iperattività, pur possedendo strategie e conoscenze metacognitive, fatica a metterle in pratica per l'incapacità di controllarsi.

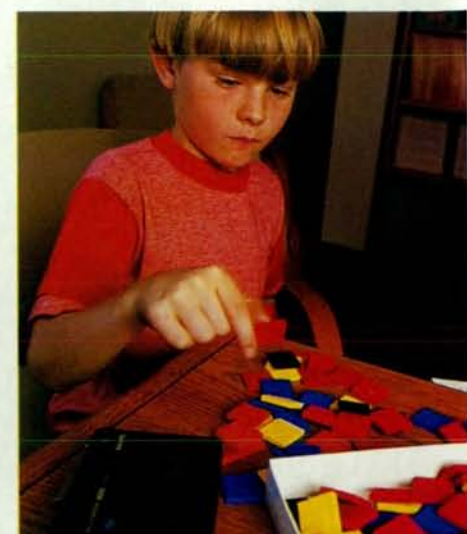
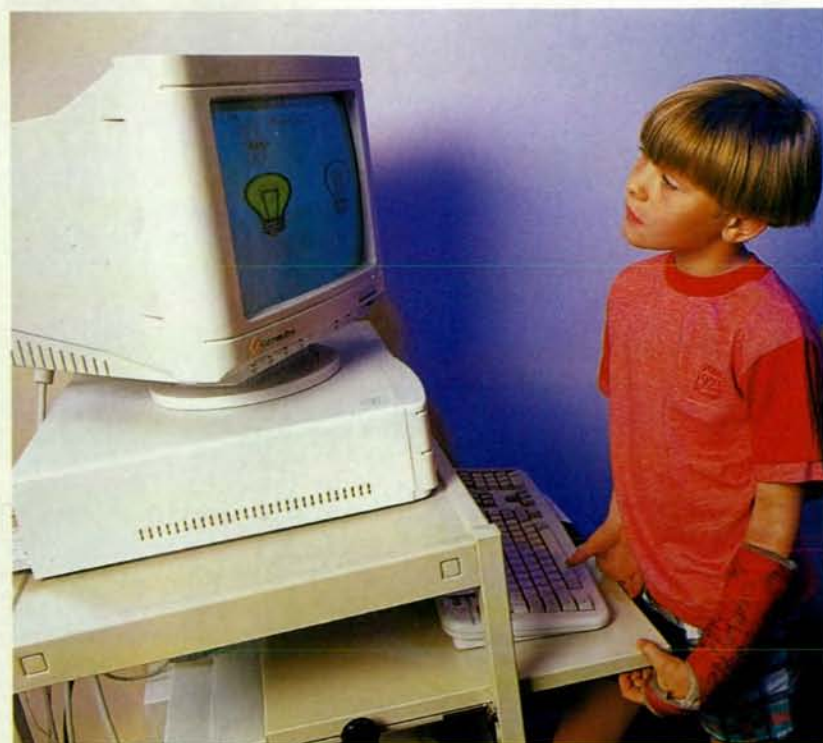
Per analizzare le opinioni dei docenti in merito al problema dell'attenzione dei loro allievi Lino Silieri, Lorenzo Lorenzoni e Donatella Tasso dell'USL 34 di Ferrara hanno condotto un sondaggio su 162 docenti di scuola media inferiore. I risultati, pubblicati sul n. 87 di «Psicologia e Scuola», hanno in realtà evidenziato che, almeno in larga maggioranza, i docenti sanno riconoscere il carattere non volontario delle difficoltà di attenzione.

Poiché è noto che mettendo in atto strategie finalizzate a costruire abilità di controllo autonomo del comportamento si possono ridurre le conseguenze negative dei disturbi di attenzione, una équipe di studiosi e ricercatori, coordinati da Cesare Cornoldi del Centro Erickson di Trento (tel. 0461829833), ha elaborato un programma di lavoro avente lo scopo di ridurre gli aspetti impulsivi e poco riflessivi attraverso modelli di autoregolamentazione nei vari ambiti d'intervento. Il programma può essere applicato a soggetti di diversa età, dalla terza elementare alla terza media.

La gestione degli incontri di lavoro organizzati per migliorare le prestazioni di soggetti con disturbi di attenzione associati a iperattività è prevalentemente affidata a psicologi e psicopedagogisti, ma può anche essere effettuata da insegnanti attenti e informati.

Il programma è articolato in 16 incontri di un'ora ciascuno e comprende tre scale di valutazione e una batteria di prove da eseguire prima e dopo l'intervento. Lo scopo è quello di promuovere un atteggiamento di controllo sui propri comportamenti e di creare una procedura da attuare sistematicamente. Tale procedura è suddivisa in cinque passaggi, così individuati: *1)* Che cosa devo fare? *2)* Considero tutte le possibilità. *3)* Fisso l'attenzione. *4)* Scelgo una risposta. *5)* Controllo la mia risposta. In questo modo l'alunno viene aiutato a pensare e scegliere il piano più appropriato prima di agire e progressivamente i passaggi della procedura, all'inizio eseguiti in maniera un po' forzata, diventano ben appresi e automatici.

PIETRO AGAPITO
psicologo dell'educazione

Tra i test psicologici utilizzati nelle ricerche sull'ADHD vi sono i quattro qui raffigurati. Il test della costruzione di una torre (*in alto a sinistra*), in cui al soggetto viene richiesto di sovrapporre alcune palline in modo da costruire una torre come illustrato in un disegno, misura la capacità di previsione, di pianificazione e di costanza. Il test di matematica (*in alto a destra*) valuta la memoria di lavoro e l'abilità nel risolvere problemi. Nel test di attenzione uditiva (*qui sotto*), il soggetto deve scegliere i tasselli colorati giusti seguendo istruzioni registrate e ignorando le parole pronunciate per distrarlo. La capacità di stimare il tempo viene misurata (*in basso a sinistra*) valutando l'attenzione visiva e il senso soggettivo degli intervalli di tempo. Al soggetto viene richiesto di tenere premuto un tasto per illuminare la lampadina che appare sullo schermo per lo stesso tempo in cui era rimasta accesa un'altra lampadina illuminata in precedenza.

Fotografie di Stephen Rose, *Gamma Liaison*

pertorio interno di informazioni, regole e motivazioni dei bambini con ADHD.

In alcuni casi, i problemi di questi bambini possono essere abbastanza gravi da richiedere l'attivazione di particolari programmi scolastici. Per quanto questi programmi non abbiano l'intendimento di curare le difficoltà del bambino, di solito forniscono un ambiente di sostegno più circoscritto e meno competitivo, in cui il bambino può ricevere un'istruzione individualizzata. La speranza è che, una volta apprese le tecniche per superare le carenze di autocontrollo, i bambini possano rientrare in una situazione scolastica normale.

Non esiste una cura per l'ADHD, ma ora si sa molto di più sul modo per fronteggiare efficacemente questo persistente e preoccupante disturbo dell'età evolutiva. Presto forse diventeranno disponibili test genetici per l'ADHD e si potranno progettare terapie più specializzate per contrastare le specifiche carenze genetiche dei bambini che soffrono di questo disturbo.

RUSSELL A. BARKLEY insegna psichiatria e neurologia presso il Medical Center dell'Università del Massachusetts a Worcester. Studia il disturbo da deficit dell'attenzione associato a iperattività da circa 25 anni e su questo argomento ha scritto numerosi volumi, tra cui negli ultimi due anni: *ADHD and the Nature of Self-Control* e *Attention-Deficit Hyperactivity Disorder: A Handbook for Diagnosis and Treatment,* entrambi pubblicati da Guilford Press.

SZATMARI PETER, *The Epidemiology of Attention-Deficit Hyperactivity Disorder* in *Child and Adolescent Psychiatric Clinics of North America*, vol. 1, a cura di G. Weiss e W. B. Saunders, 1992.

WEISS GABRIELLE e TROKENBERG HECHTMAN LILY, *Hyperactive Children Grown Up*, Guilford Press, 1993.

BARKLEY R. A., *Taking Charge of ADHD: The Complete, Authoritative Guide for Parents*, Guilford Press, 1995.

LaHOSTE G. J. e altri, *Dopamine D4 Receptor Gene Polymorphism Is Associated with Attention Deficit Hyperactivity Disorder* in «Molecular Psychiatry», 1, n. 2, maggio 1996.

Simulare molecole biologiche in acqua

Modelli al calcolatore dimostrano come l'ambiente acquoso influisca su struttura e funzionamento di molecole fondamentali per la vita

di Mark Gerstein e Michael Levitt

Il modello di dinamica molecolare dell'inibitore della tripsina pancreatica bovina (BPTI) - il «topo di laboratorio» dei chimici informatici per via della sua relativa semplicità - appare circondato dall'acqua (*sfere verdi e bianche*). Sebbene complichi molto i calcoli necessari per creare modelli di proteine, l'acqua deve essere inclusa per comprendere il comportamento delle molecole biologiche nell'ambiente acquoso della cellula.

L'acqua è a buon mercato, se non gratis, in buona parte del mondo. Ma nell'estate del 1986, uno di noi (Levitt) spese mezzo milione di dollari per una quantità di acqua che avrebbe potuto bagnare la punta di uno spillo. Il denaro ovviamente non servì per acquistare quella minuscola quantità di acqua, ma per pagare le due settimane circa di lavoro su un enorme supercomputer necessario per creare un modello del processo con cui l'acqua influisce sulla struttura e sulla dinamica di una certa proteina.

La molecola in questione era l'inibitore della tripsina pancreatica dei bovini (BPTI), che si trova nel pancreas di questi ruminanti. La BPTI rappresenta un soggetto di elezione per chi crea modelli al calcolatore, semplicemente perché è una proteina di dimensioni relativamente modeste e quindi più facile da studiare rispetto ad altre. Essa era stata studiata in precedenza da Martin Karplus e collaboratori della Harvard University, nel 1977, ma solamente *in vacuo*, ossia senza altre molecole che potessero interagire. Nessuno aveva mai visualizzato chiaramente la BPTI come esiste realmente in una cellula vivente, circondata da migliaia di molecole di acqua.

Il mezzo milione di dollari risultò ben speso. Non solo consentì a Levitt e alla sua collaboratrice Ruth Sharon di accertare che il modello *in vacuo* della BPTI non era in grado di descrivere come la proteina appare e si comporta nella realtà; ma la scoperta aprì anche la strada alla simulazione al computer della struttura di altre molecole biologiche nel loro normale ambiente acquoso.

Attualmente, grazie ai grandi progressi nella tecnologia dei computer realizzati dal 1986, è possibile creare in un paio di giorni modelli di proteine come la BPTI, con le molecole di acqua a loro associate, su un comunissimo desktop. Sono ormai state simulate al calcolatore le forme idrate di più di 50 proteine e acidi nucleici come il DNA.

Perché è tanto importante comprendere gli effetti dell'acqua sulle strutture delle molecole biologiche? Principalmente perché fornisce indicazioni sulle loro funzioni, aiutando gli studiosi a comprendere le interazioni biochimiche che nel loro insieme costituiscono la vita. Su un piano più pratico, capire le strutture delle molecole biologiche in ambiente acquoso potrà un giorno facilitare la formulazione di nuovi farmaci che agiranno bloccando o potenziando diverse vie biochimiche.

Dentro l'acqua

Per capire come l'acqua possa influire sulla struttura delle molecole biologiche, occorre in primo luogo valutare le proprietà dell'acqua stessa. Esse derivano dalla sua particolare struttura e dal modo in cui questa permette all'acqua di «gestire» le cariche elettriche di altre molecole.

Una singola molecola d'acqua (H_2O) ha una geometria essenzialmente tetraedrica, con un atomo di ossigeno al centro del tetraedro, gli atomi di idrogeno a due dei quattro angoli e nubi di cariche negative agli altri due angoli. Queste nubi elettroniche derivano dal modo in cui si combinano le strutture atomiche di ossigeno e idrogeno. In parole più semplici, l'ossigeno possiede otto elettroni, con carica negativa, che ne circondano il nucleo, carico positivamente: due elettroni sono disposti in un guscio interno e sei in uno più esterno. La capacità massima del livello interno è di due elettroni, cosicché esso è completo,

I legami idrogeno danno all'acqua le sue caratteristiche peculiari. In questo modello di acqua allo stato liquido, la molecola centrale (*sfere rossa e bianche*) ha formato legami idrogeno (*linee verdi*) con cinque altre molecole di acqua (V *rosa*). I suoi atomi di idrogeno (*in bianco*) sono legati agli ossigeni di altre due molecole di acqua, e l'atomo di ossigeno (*in rosso*) è legato a un idrogeno di ciascuna delle altre tre molecole di acqua. Ogni molecola di acqua liquida di solito forma quattro o cinque legami idrogeno.

ma il livello esterno può contenerne fino a otto. L'idrogeno possiede un solo elettrone. Quando l'ossigeno si combina con i due idrogeni, attrae l'elettrone di ciascun idrogeno nel tentativo di riempire il proprio guscio esterno. Poiché ogni elettrone dell'idrogeno passa più tempo attorno all'atomo di ossigeno che attorno al proprio nucleo carico positivamente, la molecola d'acqua risulta polare: essa possiede due nubi con lieve carica negativa attorno all'atomo di ossigeno, mentre i due atomi di idrogeno rimangono con una piccola carica positiva. Questi due tipi di carica, tuttavia, si equilibrano l'uno con l'altro, e la molecola di acqua è elettricamente neutra.

I chimici, solitamente, non raffigurano le nubi di carica negativa attorno all'atomo di ossigeno di una molecola di acqua; per convenzione, essi la rappresentano come una V (*si veda la figura in alto*). Ogni lato della V corrisponde a un legame ossigeno-idrogeno di circa 10^{-8} centimetri di lunghezza. L'angolo formato dai due lati della V è di circa 105°, ossia un po' meno dei 109,5° che rappresentano la misura dell'angolo formato dai lati di un tetraedro perfetto.

A causa della polarità delle molecole d'acqua, le interazioni tra l'idrogeno, a carica positiva, di una molecola d'acqua e l'ossigeno, a carica negativa, di un'altra sono favorite. Tali interazioni sono denominate legami idrogeno. Rispecchiando la propria geometria tetraedrica, nell'acqua allo stato liquido spesso ogni molecola forma quattro legami idrogeno: due tra i suoi idrogeni e gli atomi di ossigeno di due altre molecole di acqua, e due tra il suo atomo di ossigeno e gli idrogeni di altre molecole di acqua. Ma la struttura di dettaglio dell'acqua liquida (diversamente dal ghiaccio, che di solito è composto da un reticolo di molecole di acqua disposte secondo una geometria tetraedrica perfetta) può essere abbastanza casuale e irregolare. Il numero effettivo di legami idrogeno per molecola di acqua liquida oscilla dai tre ai sei, con una media di circa 4,5. La necessità di mantenere una configurazione tetraedrica a legami idrogeno dà all'acqua una struttura «aperta», poco compatta se paragonata con quella della maggior parte degli altri liquidi, come gli oli o l'azoto liquido.

Per costruire un modello al calcolatore dell'acqua, occorre considerare due differenti tipi di forze: intra- e intermolecolari. Le interazioni all'interno di una molecola d'acqua sono rappresentate da forze a breve raggio d'azione, create dai legami chimici tra gli atomi di idrogeno e ossigeno di ogni molecola. Le interazioni tra le molecole di acqua sono forze a lungo raggio di tipo elettrico. Le forze intramolecolari limitano le lunghezze dei legami tra l'ossigeno di ciascuna molecola di acqua e i suoi idrogeni (e l'angolo formato tra questi legami) a valori ben determinati. Queste forze si comportano come molle: più una forza esterna tende a distorcere i legami, più essi le oppongono resistenza.

Le forze intermolecolari a lungo raggio d'azione si comportano diversamente dalle forze intramolecolari, in quanto diminuiscono di valore assoluto con l'aumento della distanza. Sostanzialmente, le forze a lungo raggio nascono dall'attrazione tra cariche opposte e dalla repulsione tra cariche di uguale segno. Esse danno luogo ai legami idrogeno, nonché a forze più deboli, denominate di van der Waals.

Il sito attivo del lisozima (un enzima naturale che uccide i batteri demolendo le molecole zuccherine delle loro pareti cellulari) si trova nel solco principale della proteina (*in alto a sinistra*). Il solco è modellato esattamente per accogliere le molecole tagliate dall'enzima (*sfere viola, in alto a destra*). Un modello di come l'acqua (*sfere verdi e bianche, in basso a sinistra*) interagisce con il solco aiuta gli studiosi a disegnare una mappa del sito attivo (*in basso a destra*; la sfumatura verde indica le molecole d'acqua che vengono facilmente spostate). Queste mappe possono rappresentare la chiave per realizzare nuovi farmaci che blocchino o favoriscano l'attività di un particolare enzima.

La simulazione al computer di molecole di acqua fu sperimentata per la prima volta, nella seconda metà degli anni sessanta, da Aneesur Rahman e Frank H. Stillinger presso i Bell Laboratories. Rahman e Stillinger simularono il moto di 216 molecole di acqua in una scatola di forma rettangolare. (I ricercatori scelsero questo numero di molecole perché corrisponde a una scatola profonda, alta e larga sei molecole d'acqua.) Nella loro simulazione di cinque picosecondi (la più lunga possibile, usando la tecnologia elettronica dell'epoca), Rahman e Stillinger scoprirono che il comportamento dell'acqua è una conseguenza diretta delle relazioni energetiche intercorrenti tra le molecole. La simulazione fu in grado di riprodurre quantitativamente molte delle proprietà dell'acqua, per esempio la sua struttura media, la velocità di diffusione e il calore di evaporazione.

La simulazione della vita

L'importanza dell'acqua nei processi vitali deriva dalla sua capacità non solo di formare legami idrogeno con altre molecole d'acqua, ma anche di interagire con vari tipi di molecole biologiche. Per la sua natura polare, l'acqua reagisce facilmente con altre molecole polari e dotate di carica, come acidi, sali, zuccheri e varie regioni delle proteine e del DNA. Come conseguenza di tali interazioni, l'acqua può portare in soluzione le molecole polari, che sono pertanto denominate idrofile («attratte dall'acqua»). Per contro, l'acqua non interagisce facilmente con le molecole non polari, come i grassi: tutti sanno che olio e acqua non sono miscelabili. Le molecole non polari sono pertanto denominate idrofobe («che temono l'acqua»).

Le molecole biologiche, come le proteine e il DNA, contengono porzioni sia idrofile sia idrofobe distribuite in lunghe catene. Le strutture tridimensionali di queste molecole sono dettate dal modo in cui tali catene si avvolgono in strutture più compatte, così che i gruppi idrofili stanno in superficie interagendo con l'acqua, mentre i gruppi idrofobi sono confinati all'interno, lontano dall'acqua. Nel 1959 Walter Kauzmann propose che tale azione idrofoba fosse essenziale per l'avvolgimento delle proteine e il ruolo delle proprietà idrofobe in tale processo è ancora oggi un tema di grande interesse (si veda l'articolo *Il problema dell'avvolgimento delle proteine* di Frederic M. Richards in «Le Scienze» n. 271, marzo 1991).

Vi sono tre tipi di molecole d'acqua che devono essere presi in considerazione quando si vuole costruire al computer il modello di una molecola biologica in soluzione acquosa: l'acqua «associata», ossia quella che circonda la molecola e interagisce fortemente con essa; l'acqua «libera» all'intorno, e quella che può essere contenuta entro la molecola. Una singola cellula contiene miliardi di molecole di acqua: quasi tutto lo spazio non occupato dagli atomi che compongono le molecole biologiche è

Molecole di forma quasi identica interagiscono in modo diverso con l'acqua, a seconda che siano polari - ovvero che abbiano cariche parziali su alcuni atomi - o che non abbiano cariche e quindi siano prive di polarità. L'urea, una molecola polare che si trova nell'urina, forma legami idrogeno con le molecole di acqua (*sfere viola, in alto*). Invece l'isobutene, non polare, non forma tali legami; le molecole d'acqua legate tra loro con legami idrogeno attorno all'isobutene formano una struttura a gabbia (*sfere verdi, in basso*).

colmato da acqua. Le cellule umane sono, in effetti, costituite soprattutto da acqua, che rappresenta circa il 60 per cento del peso del corpo umano.

Come possiamo introdurre nel modello tutti questi tipi di acqua, insieme con i singoli atomi di una molecola biologica? Detto in breve, descriviamo dapprima le interazioni fondamentali tra tutti gli atomi e lasciamo che il sistema evolva secondo le leggi della fisica newtoniana. Questa simulazione necessita di due ingredienti di base: un modo per descrivere le interazioni all'interno e tra l'acqua e le molecole biologiche (ossia le forze intra- e intermolecolari), e una procedura per riportare in grafico i loro movimenti nel tempo, che costituiscono la dinamica molecolare.

Con questo metodo si ottiene una sequenza di configurazioni molto simili ai fotogrammi di un film. Ogni atomo si muove nel tempo in una serie di «passi» distinti, che chiamiamo «fasi temporali». Essenzialmente, la nuova posizione di un atomo è data da quella precedente sommata alla distanza compiuta in una data fase temporale. Se sull'atomo non agisse alcuna forza, la distanza percorsa sarebbe funzione della sua velocità nella posizione precedente, poiché la distanza è uguale alla velocità moltiplicata per il tempo. Durante una fase temporale, tuttavia, le forze esercitate da altri atomi provocano l'accelerazione dell'atomo, che quindi modifica la propria velocità. Se le forze sono costanti durante la fase temporale, le leggi di Newton stabiliscono che la variazione di velocità è proporzionale alla forza applicata, così che è possibile calcolare una velocità aggiornata. Si può inoltre sfruttare tale velocità per calcolare la nuova posizione dell'atomo. Gli atomi di un liquido che interagiscono fortemente non possono allontanarsi molto, e quindi è necessario utilizzare una fase temporale molto breve: un femtosecondo, pari a 10^{-15} secondi. In questo periodo, una molecola d'acqua si sposta solo 1/500 del suo diametro.

In una simulazione di lunga durata, il calcolo di ciascuna fase temporale per tutti gli atomi di una molecola biologica con la sua acqua associata produce una enorme massa di dati. Una piccola proteina in acqua, per esempio, fornisce mezzo milione di terne di coordinate cartesiane in un nanosecondo, ciascuna delle quali descrive la posizione di circa 10 000 atomi. Il film generato da questa simulazione è molto dettagliato: si può vedere ogni molecola di acqua che ruota, scorre e vibra in milioni di immagini.

Per spiegare come la simulazione al computer possa rappresentare il modo in cui l'acqua influisce sulla dinamica molecolare, bisogna prendere in considerazione due semplici molecole organiche, l'isobutene e l'urea, che hanno configurazione simile ma proprietà molto diverse. L'isobutene, un combustibile derivato dalla raffinazione del petrolio, è una molecola con configurazione a Y, non polare (e quindi idrofoba), il cui scheletro consiste in quattro atomi di carbonio, due dei quali sono uniti da un doppio legame. L'urea è un prodotto del metabolismo proteico escreto con l'urina. Anch'essa possiede una configurazione a Y: un gruppo carbonile (C=O) è legato a due gruppi amminici (NH_2). Diversamente dall'isobutene, l'urea è una molecola a forte polarità, e quindi idrofila.

Quando si effettuano le simulazioni al computer per l'isobutene e l'urea, si nota che l'acqua attorno alle due molecole si comporta diversamente. Le molecole d'acqua interagiscono direttamente con l'urea, formando legami idrogeno con gli atomi di ossigeno e di idrogeno di quest'ultima, oltre che con quelli di altre molecole d'acqua. Al contrario, le molecole di acqua rimangono lontane dall'isobutene, che è idrofobo, e formano legami idrogeno solo tra loro, creando una «gabbia» di acqua che circonda la molecola dell'isobutene.

La visualizzazione del modo in cui l'acqua interagisce con queste molecole semplici aiuta a capirne il comportamento in presenza di molecole biologiche più complesse, quali le proteine e gli acidi nucleici. L'acqua, per esempio, è una parte fondamentale della struttura del DNA. I primi tentativi di creare modelli di dinamica molecolare del DNA *in vacuo* fallirono perché le forze di repulsione tra i gruppi fosfato che compongono lo scheletro della doppia elica del DNA, carichi negativamente, causavano la rottura della molecola dopo soli 50 picosecondi. Alla fine degli anni ottanta, Levitt e Miriam Hirshberg, del National Institute for Medical Research di Londra, riuscirono a creare un modello di DNA della durata di 500 picosecondi includendovi molecole di acqua che stabilizzavano la struttura a doppia elica formando legami idrogeno con i gruppi fosfato. Successive simulazioni del DNA in ambiente acquoso hanno rivelato che le molecole di acqua sono in grado di interagire con quasi ogni porzione della doppia elica del DNA, comprese le coppie di basi che costituiscono il codice genetico.

La doppia elica del DNA (*sopra*) ha due filamenti con uno scheletro di gruppi fosfato (*sfere rosse e gialle*) avvolti attorno a una «pila» di coppie di basi (*sfere grigie, blu, rosse e bianche*). La sezione di una simulazione di DNA in acqua (*a lato*) mostra come le molecole di acqua (V *verdi e bianche*) riescano a penetrare in profondità nella struttura a doppia elica del DNA, rendendola più stabile. Le sfere viola indicano gli ioni sodio nella soluzione acquosa.

Al contrario, l'acqua non è in grado di penetrare in profondità nelle strutture delle proteine, le cui porzioni idrofobe sono ripiegate all'interno in un nucleo compatto. Di conseguenza, le simulazioni acqua-proteina si sono concentrate sulla superficie della molecola proteica, che è molto meno strettamente impaccata rispetto alla parte interna.

Il modo in cui le molecole di acqua interagiscono con la superficie delle proteine dà luogo a geometrie molto interessanti, in particolare nei solchi profondi sulla superficie degli enzimi, proteine che favoriscono le reazioni chimiche nelle cellule. Le molecole di acqua unite da legami idrogeno hanno difficoltà a inserirsi in questi solchi e vengono facilmente spostate dai ligandi - le molecole con le quali un enzima è destinato a interagire - il che può spiegare il motivo per cui i siti attivi degli enzimi si trovano di frequente nei solchi. Spesso si rileva che la disposizione delle molecole di acqua in un sito attivo vuoto imita la geometria e la struttura del ligando, un fenomeno, questo, che talvolta si sfrutta nella formulazione dei farmaci.

L'alfa elica, una struttura che si riscontra nella maggior parte delle proteine, può svolgersi più agevolmente in acqua perché le molecole di acqua possono sostituire i legami idrogeno (*linee verdi*) che normalmente tengono insieme l'elica. Una molecola di acqua (*in verde*) sta creando un ponte tra un atomo di ossigeno (*in rosso*) e un gruppo NH (*in blu*), che normalmente si trova legato nell'elica avvolta a spirale.

Vivere nel mondo reale

Quanto si avvicinano alla realtà le simulazioni delle molecole biologiche in acqua? Purtroppo non è possibile rispondere a tale domanda in via definitiva, poiché nessuna tecnica sperimentale può fornire informazioni tanto dettagliate riguardo alle singole molecole e alle loro interazioni quanto la creazione di modelli al computer. Ciò che è possibile fare è confrontare diversi valori ottenuti dalle simulazioni con i risultati sperimentali.

Uno dei principali metodi di approccio che può essere utilizzato per verificare le strutture di molecole biologiche simulate in ambiente acquoso è la diffusione di neutroni e raggi X. In un esperimento di questo tipo si dirige un fascio di neutroni su un piccolo campione e si registra come vengono diffusi dalle molecole che lo costituiscono. Gli spazi intermolecolari si comportano ognuno come una piccolissima fenditura, che fornisce una caratteristica figura di diffrazione. Analizzando queste figure, è possibile determinare facilmente le distanze intermolecolari. Il confronto fra i risultati della diffusione di neutroni e le simulazioni al computer mostra che, in media, le distanze coincidono.

Per confermare la dinamica di una simulazione molecolare, si mette a confronto il comportamento previsto della molecola biologica simulata in acqua con le sue proprietà verificate in laboratorio. Per esempio, la maggior parte delle proteine contiene almeno un'alfa elica, ossia una regione in cui gli amminoacidi che compongono la proteina si attorcigliano a formare una spirale. Dai risultati sperimentali si sa che il calore provoca lo svolgimento di queste alfa eliche, mentre nei primi tentativi di simulazione del comportamento di una alfa elica semplice *in vacuo*, a elevate temperature, l'elica rimaneva intatta. Solo introducendo l'acqua nella simulazione Levitt e Valerie Daggett, dell'Università di Washington, furono in grado di simulare il reale comportamento di un'alfa elica.

Le simulazioni al computer forniscono un numero sempre maggiore di informazioni riguardanti la forma di molte molecole biologiche e il modo in cui esse svolgono i loro compiti in un organismo vivente. Tuttavia, se si cerca di condurre simulazioni di molecole biologiche sempre più complesse nell'ambiente acquoso ci si imbatte ancora nei limiti della tecnologia informatica e nei costi di utilizzo dei supercomputer. Quando gli scienziati pubblicano modelli di molecole biologiche, di solito li rappresentano con colori brillanti su sfondo uniforme: ora si sa che l'ambiente in cui queste molecole esistono - l'acqua - è importante quanto la loro struttura stessa.

MARK GERSTEIN e MICHAEL LEVITT collaborano dal 1993, quando Gerstein è diventato membro del Dipartimento di biologia strutturale della Stanford University, dove Levitt è preside. Levitt, laureatosi nel 1971 all'Università di Cambridge, ha avuto incarichi accademici presso il Laboratory of Molecular Biology di Cambridge, il Salk Institute for Biological Studies di San Diego e il Weizmann Institute of Science di Rehovot, in Israele. Già consulente di società farmaceutiche, Levitt ha fondato la Molecular Applications Group di Palo Alto, in California. Gerstein è professore assistente alla Yale University; ha conseguito la laurea a Cambridge nel 1993.

LEVITT MICHAEL e PARK BRITT H., *Water: Now You See It, Now You Don't* in «Structure», 1, n. 4, 15 dicembre 1993.

GERSTEIN MARK e CHOTHIA CYRUS, *Packing at the Protein-Water Interface* in «Proceedings of the National Academy of Sciences USA», 93, n. 19, 17 settembre 1996.

Per gli archivi elettronici delle strutture molecolari, visitare bioinfo.mbb.yale.edu e hyper.stanford.edu su World Wide Web.

Continua la battaglia contro le mine antiuomo

Michele Cazzani

In marzo entrerà in vigore il Trattato di Ottawa, ma non basta: occorrono tecnologie economiche ed efficaci per bonificare il pianeta da una piaga che continua a mietere migliaia di vittime

di Pietro Mazzinari

La buona notizia è che il Mine Ban Treaty, l'accordo per il bando delle mine antiuomo firmato a Ottawa nel dicembre 1997, è dal 16 settembre scorso una legge internazionale ed entrerà in vigore con effetto vincolante a partire dal 1° marzo 1999. Un'altra buona notizia è la rapidità con cui i Parlamenti di 40 paesi fra i 130 firmatari hanno ratificato il Trattato; un record assoluto nella storia delle convenzioni internazionali.

Ma le cattive notizie sono, per ora, più numerose. Per cominciare, non hanno ancora ratificato il Trattato Cina, Stati Uniti e Russia, il cui peso politico è determinante per far avanzare la campagna per il bando delle mine. Altri - come Cuba, Egitto, India, Irak, Iran, Pakistan, Siria e Libia - non solo non intendono ratificarlo, ma al contrario hanno più volte boicottato, in riunioni internazionali, risoluzioni di sostegno al Trattato. Infine, non hanno ancora ratificato il Trattato, pur avendolo firmato, paesi che ospitano tuttora consistenti depositi statunitensi di mine antiuomo: Grecia, Giappone, Spagna e Italia. Per quanto riguarda il nostro paese, la scusa ufficiale è che l'adesione ne farebbe fare un passo indietro rispetto alla Legge nazionale, approvata nell'ottobre 1997, che amplia il bando anche alle mine anticarro, non previste dal Trattato di Ottawa. Secondo le organizzazioni umanitarie coinvolte nella Campagna internazionale per la messa al bando delle mine antiuomo (insignita nel 1997 del Nobel per la pace) questi paesi non ratificherebbero il Mine Ban Treaty per non sollevare contrasti con l'alleato statunitense.

Le difficoltà dello sminamento

L'adesione al Trattato di un sempre maggior numero di paesi è il nocciolo politico determinante perché la Campagna internazionale abbia successo. Ma altrettanto indispensabile per disinquinare il pianeta da questa minaccia, che continua a fare oltre 26 000 vittime all'anno, è lo sforzo tecnologico per mettere a punto sistemi affidabili, pratici ed economicamente accettabili per riconoscere, individuare e distruggere questi ordigni. Secondo i dati più recenti il rapporto tra il costo di una mina e quello della sua distruzione è ancora spaventosamente sbilanciato: in media, produrre e mettere a dimora una mina costa circa 5 dollari, mentre individuarla e distruggerla ne può costare anche 1000.

La componente più pesante del costo è dovuta alle difficoltà di individuare con sicurezza l'ordigno: nel suo intervento al «Simposio internazionale sulle tecnologie di sminamento» che si è recentemente svolto al Centro comune di ricerca di Ispra, Edith Cresson - commissario europeo per la ricerca e l'innovazione - ha ricordato che solo un migliore coordinamento fra le tecnologie di sminamento consentirà di «integrare i risultati per ridurre i falsi allarmi, che fanno perdere tempo prezioso ed elevano i costi». Infatti, mentre gli accordi internazionali prevedono che i campi minati siano segnalati e riguardino esclusivamente zone di guerra, nei recenti conflitti la disseminazione di mine ha quasi sempre avuto lo scopo di agire come deterrente nei confronti della popolazione civile, sia per ottenere risultati di «pulizia etnica», sia per minare il sostegno della popolazione alle formazioni delle guerriglie. In questi casi, è proprio la distribuzione indiscriminata e imprevedibile delle mine quella che consegue i migliori risultati.

Batteri a caccia di TNT

Il metodo più usato per rilevare la presenza di mine antiuomo si basa sull'impiego di *metal detector*: una tecnologia ampiamente collaudata, che tuttavia presenta gravi rischi per gli operatori, soprattutto a causa dell'uso sempre più intenso di mine costruite in gran parte, se non totalmente, in plastica e perciò «invisibili» al metal detector. Ancora largamente utilizzati, per esempio dalle missioni ONU in Afghanistan, sono i cani addestrati a riconoscere tracce di vapori esplosivi. In entrambi i casi, si tratta di sistemi costosi, lenti e ad alto rischio, che dovranno essere sostituiti da tecnologie più avanzate se si vuole avvicinarsi al limite indicato dal Trattato di Ottawa, che fissa in 10 anni il tempo previsto per l'eliminazione delle mine sul terreno.

Tra i metodi più innovativi sembrano promettenti quelli basati su batteri bioingegnerizzati, in qualche modo parenti di quelli già utilizzati, per le loro particolari preferenze alimentari, nel disinquinamento da idrocarburi o da metalli pesanti. In questo caso si tratta di un ceppo di batteri del genere *Pseudomonas* nel cui DNA è stato inserito un gene proveniente da una specie di meduse che brillano quando sono illuminate da luce ultravioletta. I batteri in questione sono ghiotti di trinitrotoluene (TNT, o tritolo), un esplosivo che non manca mai nelle mine, e lo individuano per metabolizzarlo anche dove è presente in una parte su un miliardo. A causa dell'inserimento del gene della medusa, però, anziché trasformare il TNT in qualche altro prodotto chimico, i batteri acquistano la proprietà di illuminarsi alla luce ultravioletta.

Negli esperimenti condotti presso gli Oak Ridge National Laboratories nel Tennessee (un centro militare, a dimostrazione di come la sperimentazione in questo settore sia ancora intrecciata ai programmi strategici), dopo 3-4 ore da quando sono stati sparsi sul terreno, i batteri che hanno individuato il TNT, spazzati da un fascio di luce ultravioletta, formano macchie fluorescenti in corrispondenza degli ordigni. Finora gli esperimenti hanno dato buoni risultati in laboratorio. Il prossimo passo sarà una prova in un campo minato sperimentale, in una notte buia e senza luna, affinché i soli bagliori presenti siano quelli dei batteri.

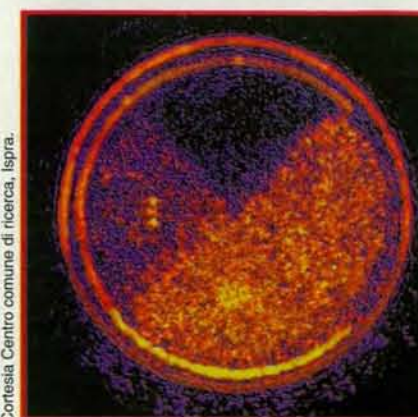
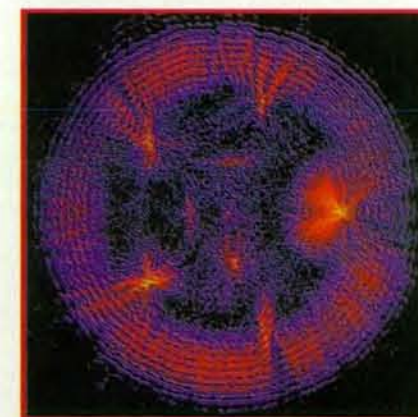
Nel frattempo verranno controllati gli effetti a distanza dei batteri mutati che, secondo i loro inventori, dovrebbero morire dopo essere stati esposti alla luce del sole per 5-7 giorni. C'è infatti chi teme che spargere microrganismi geneticamente modificati possa avere pericolose e incontrollabili conseguenze: non ci sarebbe alcun vantaggio a ripulire un terreno dalle mine se poi lo si rende avvelenato e inutilizzabile per altri usi.

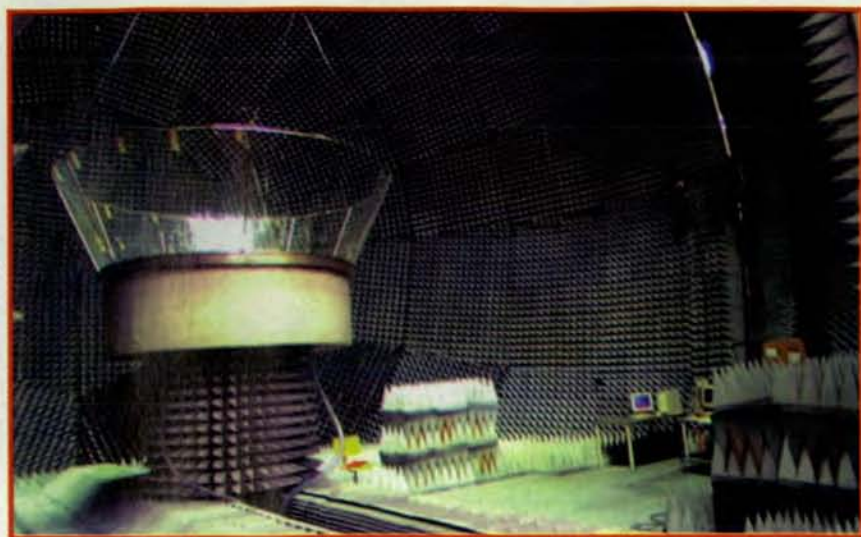
Altri studi, in corso presso il Savannah River Technology Center nel South Carolina, cercano di scovare batteri naturalmente inclini a diventare luminescenti per effetto dell'assorbimento di TNT e altri ancora, ai Sandia National Laboratories nel New Mexico, si propongono di rilevare le mine mediante prodotti chimici. I ricercatori dei Sandia puntano su minuscole particelle cave di silicio che dovrebbero contenere una miscela di sostanze chimiche in grado di reagire emettendo luce a contatto dei vapori di TNT. Più o meno come i batteri, con il vantaggio di non dar luogo a generazioni successive di organismi mutanti capaci di entrare nella catena alimentare con inattese prodezze. Anche questi segnalatori presentano comunque incognite per suoli e falde acquifere.

A fronte dei rischi di inquinamento chimico o biologico, questi sistemi avrebbero il vantaggio di costare poco: i ricercatori di Oak Ridge hanno calcolato che i cinque litri di batteri modificati che servirebbero a coprire la superficie di un ettaro costerebbero circa un dollaro, cui vanno naturalmente aggiunte le spese per «seminarli» e rivelarne la luce.

Da *Microcosme vivant*, ed. Roche, Basel, 1991.

Per il rilevamento delle mine si sta tentando di usare un batterio del genere *Pseudomonas* geneticamente modificato.

Cortesia Centro comune di ricerca, Ispra.

Le «impronte» di tre diversi tipi di mine antiuomo ottenute con la camera anecoica EMSL del Centro comune di Ispra.

Cortesia Centro comune di ricerca, Ispra.

Qui sopra, una vista della camera anecoica EMSL dove vengono effettuate le prove dei sensori radar per il rilevamento delle mine antiuomo.

Rivelatori ultrasensibili e tecnologie spaziali

Molto più cari, ma non inquinanti, sono i metodi di rilevamento delle mine basati sulle misure ottiche e infrarosse e sul rilevamento radar. Di questi metodi si è soprattutto parlato al Simposio di Ispra. Al Centro comune di ricerca sono infatti in corso almeno dal 1994 esperimenti e programmi per definire tecnologie e standard di valutazione dei sensori ottici e nelle microonde.

In particolare, il Centro è il nodo principale del programma GIS (Geographic Information System), voluto e finanziato dall'Unione Europea, che si propone di eseguire una mappatura completa delle aree infestate dalle mine, utilizzando riprese aeree e satellitari delle zone di conflitto. Informazioni dettagliate verranno ottenute confrontando le immagini riprese prima, durante e dopo gli interventi armati. A questi dati si dovranno sommare quelli ricavati dalla scansione delle aree probabilmente inquinate eseguita con aerei provvisti di sensori ottici e radar. Tutti i dati raccolti faranno parte di un unico database, conservato a Ispra e accessibile in rete dalle strutture politiche e amministrative dell'UE e dalle organizzazioni impegnate nella lotta contro le mine antiuomo.

Due laboratori di Ispra sono dedicati al supporto e alla valutazione delle tecnologie e dei prodotti utilizzati per raccogliere il più vasto archivio possibile di «impronte digitali» delle mine. Alla European Goniometric Facility (EGO) si possono perfezionare e valutare i sensori che individuano le mine in base alle differenze tra le loro proprietà di riflettanza (la luminosità relativa rispetto a un dato campione) ed emittanza (la potenza irradiata per unità di area da una superficie radiante) e quelle dell'ambiente circostante.

Lo European Microwave Signature Laboratory (EMSL) è invece una camera anecoica di 20 metri di diametro in cui è possibile operare in condizioni ambientali stabili e riproducibili per ottenere con un sensore a microonde un'immagine tridimensionale della mina, anche se priva di parti metalliche e nascosta nel terreno. I dati così registrati permettono di identificarla senza rischi di errore e di costruire un vero e proprio archivio segnaletico degli ordigni antiuomo.

Il riconoscimento radar si basa sulle proprietà elettromagnetiche delle mine rispetto all'ambiente. La costante dielettrica di una mina ha un valore compreso tra 2 e 3, quella del terreno da 2 a 25. Inoltre, la mina ha caratteristiche di simmetria e geometria costruttiva che di rado si trovano in oggetti naturali, come sassi o prodotti vegetali. Se poi la mina è in acqua o in terreni paludosi, con sensori radar dovrebbe essere abbastanza facile rivelarne la presenza, perché la costante dielettrica dell'acqua è circa 80.

Una questione di soldi

Sensori di questo tipo esistono, o possono essere prodotti adattando apparecchi già in uso in altri campi (i principali costruttori sono produttori di tecnologie per avionica e radaristica militare); i laboratori di Ispra possono fornire gli elementi per fissare gli standard. Eppure, queste tecnologie continuano a essere sperimentali: vengono presentate ai convegni, se ne fa qualche dimostrazione, ma poi la bonifica continua a essere fatta a mano o con i cani addestrati.

La prima risposta a questa contraddizione solo apparente è di tipo economico: costruire e sperimentare questi strumenti costa molto e non sono certo paesi come Angola, Vietnam o Bosnia, ridotti al lastrico dalle spese di ricostruzione del loro territorio, a rappresentare un mercato per i sensori ad alta tecnologia. Una soluzione potrebbe essere la costituzione di un'agenzia europea che, una volta accertata l'efficacia delle tecnologie proposte, le acquisterebbe in proprio per poi distribuirle ai paesi che ne hanno bisogno, sotto forma di prestito o di aiuto umanitario. In altri termini, come ha rilevato Rolf Linkhor, parlamentare europeo primo firmatario di tutte le iniziative legislative nella lotta alle mine antiuomo, sarebbe il commissario Edith Cresson a finanziare e validare gli studi sui migliori sistemi integrati di rilevamento e distruzione che verrebbero poi acquistati dal commissario per gli aiuti umanitari Emma Bonino per essere «prestati» ai paesi inquinati.

In attesa che queste volonterose utopie diventino realtà, le briciole disponibili per ricerca e sviluppo sono ancora poche. Nel IV Programma quadro dell'UE Edith Cresson è riuscita a ottenere uno stanziamento di circa 30 miliardi di lire per un programma sulle nuove tecnologie di ricerca, identificazione e disattivazione delle mine: poca cosa, e con il vincolo chiaro e ripetuto che questi soldi devono andare solo a progetti di ricerca, e non a sovvenzionare operazioni sul campo. Il V Programma quadro, che coprirà il periodo 1999-2002, non prevede per ora nuovi interventi in questo settore. Anche perché è in corso un pesante, e non nuovo, attacco alla gestione della ricerca scientifica europea e del Centro comune in particolare, che alcuni (primi fra tutti inglesi e tedeschi) vorrebbero ridimensionare. Anche se nel ridimensionamento proposto viene esplicitamente «salvata» la ricerca applicata alla protezione del consumatore e alle tecnologie di sminamento, resta il fatto che i politici premono per ridurre la quota destinata alla scienza di circa due miliardi di Ecu. Un taglio consistente per i ricercatori, ma poca cosa rispetto, per esempio, alle faraoniche spese agricole europee: corrisponde infatti a quanto l'Europa stanzia ogni anno solo per sovvenzionare i coltivatori di tabacco.

PIETRO MAZZINARI è un giornalista scientifico che lavora come *free lance*.

Per chi volesse approfondire l'argomento, suggeriamo di visitare il sito del Centro comune di ricerca di Ispra:

http://www.ei.jrc.it/landmines

Il Centro di Ispra ha anche prodotto il CD-Rom *The Mining R&D Support*.

Strategie riproduttive dei ragni

di Ken Preston-Mafham e Rod Preston-Mafham
Fotografie di Ken Preston-Mafham

I maschi dei ragni hanno evoluto affascinanti comportamenti per corteggiare le loro difficili partner, che a volte ricambiano divorando gli occasionali compagni

Afferrando i cheliceri della femmina per prevenire un possibile morso, un maschio di *Tetragnatha extensa* (Tetragnatidi) si accinge ad accoppiarsi. La femmina (*a destra*) è consenziente; in caso contrario avrebbe respinto il maschio saltellando minacciosamente sulla propria tela. Inoltre essa accoglie il maschio con i cheliceri esposti, il che è evidentemente un segnale di seduzione, non di minaccia. L'accoppiamento richiede circa 15 minuti e, nonostante l'assenza di aggressività della femmina, appena terminato l'accoppiamento il maschio balza prontamente fuori dalla tela, temendo che l'ex compagna sia affamata. (Distribuzione di *Tetragnatha extensa*: Eurasia e Nordamerica settentrionale; l'ingrandimento è di circa 27 volte.)

L'apparato riproduttore dei ragni ha poche somiglianze con quello di qualsiasi altro gruppo del regno animale. Dal capo sporgono due appendici, i pedipalpi, che sono strutture sensoriali impiegate soprattutto per afferrare le prede. Nei maschi i segmenti terminali dei «palpi» sono modificati allo scopo di poter introdurre lo sperma nel corpo della femmina.

L'organo palpale - la principale struttura copulatoria del maschio - può essere paragonato a una pipetta da laboratorio: da una camera che funge da serbatoio si allunga un sottile tubo, l'embolus, che termina con un'estremità appuntita e aperta attraverso cui passa lo sperma. Durante l'accoppiamento il maschio introduce l'embolus nell'apertura riproduttiva della femmina. In alcune famiglie più evolute di ragni, l'organo palpale è circondato da un complesso di placche sclerotizzate, uncini e spine, mentre le femmine hanno contemporaneamente evoluto una loro struttura sclerotizzata, l'epigino, situato vicino all'apertura riproduttiva. Le appendici del palpo maschile si adattano solo all'epigino della femmina della stessa specie.

Gli organi palpali non sono direttamente collegati con i testicoli; ne deriva che, prima dell'accoppiamento, il maschio deve riempire di sperma i serbatoi del palpo. Per prima cosa esso depone una goccia di sperma sul filo prodotto dalle sue filiere. Questo può essere un singolo filo teso tra un paio di zampe o una semplice tela lassa trattenuta allo stesso modo oppure, nei ragni più evoluti, una tela appositamente costruita, fissata a un substrato contiguo. Successivamente il maschio, portando l'estremità dell'embolus sulla goccia di sperma, la aspira nel serbatoio. In alcune specie il maschio riempie entrambi gli organi palpali; in altre uno soltanto, così da dover tornare, dopo un turno di copulazione, a riempire l'altro. Una volta provvisto di sperma, il maschio va alla ricerca di una femmina recettiva. (Nella famiglia Linyphiidae, però, esso inizia a preparare lo sperma solo se stimolato dal contatto con i feromoni presenti sulla tela della femmina.)

Si potrebbe pensare che i maschi dei ragni costruttori di tele si trovino di fronte a un ostacolo insormontabile nella ricerca della partner, la quale deve essere individuata in uno spazio tridimensionale. Tuttavia sono le femmine a venire loro incontro attirandoli verso le proprie tele con l'emissione di feromoni guida. Le femmine dei ragni che non costruiscono tele permanenti, ma che si muovono alla ricerca di prede, trascinano sempre dietro di sé un singolo filo impregnato di feromoni; così il maschio della stessa specie che trova il filo è capace di risalire lungo di esso fino alla femmina. Le femmine del ragno pescatore americano *Dolomedes triton* liberano i feromoni nell'acqua, vicino alla loro zona di caccia, facilitando la ricerca ai maschi.

I ragni possono anche effettuare qualche forma di corteggiamento, da quello più sbrigativo dove il maschio sale sulla femmina per indurla a essere compiacen-

Un accoppiamento che dura dall'alba al tramonto potrebbe essere una strategia di sopravvivenza per *Tylorida ventralis*, un altro tetragnatide. La femmina (*a sinistra*) è particolarmente cooperativa: non solo rimane in accoppiamento ininterrottamente per circa una settimana con lo stesso maschio, ma spesso è lei a fare la prima mossa. Tale comportamento potrebbe essere legato alla presenza, nella regione, di ragni predatori di altri aracnidi; stare con il partner dimezza la probabilità di diventare una preda. (Distribuzione di *Tylorida ventralis*: Asia meridionale, e a est fino alla Nuova Guinea.)

Filando un velo nuziale, un maschio di *Oxyopes schenkeli* corteggia una femmina. Dapprima le accarezza il dorso con le zampe anteriori (*a sinistra*); per tutta risposta la femmina si allontana e si lascia cadere dal margine di una foglia, penzolando dal suo filo. Il maschio allora scende e comincia a girarle intorno più volte, avvolgendo il filo attorno al corpo della femmina, come se essa fosse un rocchetto (*al centro*). Quando è ben avvolta, il maschio cerca di accoppiarsi. Sfortunatamente per lui, verso la fine della stagione riproduttiva - proprio quando sono state riprese le immagini qui riprodotte - può capitare che al termine della «filatura», la femmina non sia più disponibile. Quella qui ripresa si è liberata facilmente dai legami, ha immobilizzato il maschio con i cheliceri (*a destra*), e poi ha incominciato a mangiarlo. (Distribuzione di *Oxyopes schenkeli*: Africa centrale, soprattutto Congo e Uganda.)

te, a quello più elaborato in cui il maschio viene respinto più volte prima di riuscire ad accoppiarsi. Nei predatori attivi, dotati di grandi occhi - come i nicosidi e i salticidi - i maschi segnalano le loro intenzioni alle femmine esibendo i palpi talvolta vivacemente colorati. Alcuni maschi, prima dell'accoppiamento, sottomettono fisicamente le femmine.

Per certi maschi, peraltro, l'accoppiamento costituisce un serio pericolo. In un numero limitato di specie - in particolare nelle vedove nere - dopo la copula spesso la femmina divora il maschio. In molti ragni, tuttavia, maschi e femmine hanno mascelle delle stesse dimensioni e, dal momento che il maschio è considerevolmente più agile, la femmina corre lo stesso rischio di venire attaccata quanto di attaccare. Inoltre, le femmine di alcune specie hanno una taglia diverse volte superiore a quella dei maschi, ma questi ultimi sembrano perfettamente al sicuro condividendo la stessa tela.

Tutto sommato, nei ragni questi strani comportamenti riproduttivi si sono dimostrati di grande successo.

Sorvegliando una femmina in muta *(a destra)*, un maschio di *Leucauge nigrovittata* è sicuro che si accoppierà con una vergine. Quando la femmina, appena terminata la muta, ha recuperato le forze, si mette a oscillare in segno di invito. Dopo l'accoppiamento il maschio si allontana, ma la femmina lo richiama altre due volte. Il rapporto, tuttavia, viene interrotto da una seconda femmina che si è lanciata sulla tela con la pretesa di accaparrarsi il maschio. Questo cerca di respingerla, ma lei non si dà per vinta e alla fine il maschio acconsente a un breve amplesso prima di ritornare dalla prima femmina *(sotto)*. (Distribuzione di *Leucauge nigrovittata*: Giava, Sumatra e Borneo.)

Il maschio di *Meta segmentata* effettua il rituale di corteggiamento offrendo le spoglie di un rivale. Spesso diversi maschi lottano per conquistare una buona posizione sulla tela della femmina, il che provoca qualche vittima. Questo maschio *(a sinistra)* ha volto la situazione a proprio vantaggio, utilizzando il corpo del perdente, avvolto dal filo, come dono nuziale alla femmina. Di solito aspetta invece che una mosca cada nella tela. (Distribuzione di *Meta segmentata*: Europa, Asia temperata e Canada.)

Deponendo un delicato merletto di fili, un maschio di *Nephila maculata* cammina sul dorso dell'enorme femmina. Sebbene quest'ultima generalmente lo ignori, talvolta cerca di cacciarlo via. Quando ci riesce, comincia a distruggere la paziente opera del partner, tanto che i maschi, forse per evitare queste interruzioni, cercano di deporre il filo mentre la femmina è intenta a cibarsi. Il filo, applicato vicino ai recettori olfattivi della femmina, viene impregnato di feromoni e presumibilmente trasmette un messaggio sessuale. (Distribuzione di *Nephila maculata*: Asia meridionale fino al Giappone e all'Australia settentrionale.)

Legata la femmina a una foglia, un maschio di *Xysticus cristatus* cammina in lungo e in largo sopra il corpo della partner, che è molto più grande. Poi si sposta sotto di lei e si accoppia per circa un'ora; infine si allontana. La femmina riesce a liberarsi con relativa facilità, dimostrando che l'averla legata non è una garanzia di sicurezza per il maschio, ma un rituale il cui scopo è sconosciuto. (Distribuzione di *Xysticus cristatus*: Europa, Nordafrica e gran parte dell'Asia.)

KEN e ROD PRESTON-MAFHAM, fratelli, sono entrambi naturalisti. Ken è un fotografo che con il suo obiettivo ha catturato più di 3000 specie in 40 paesi, in particolare insetti e ragni. È autore o coautore di circa 20 libri; recentemente è tornato alle sue ricerche iniziali, pubblicando articoli sul comportamento degli insetti e dei ragni. Rod, autore di parecchi volumi, si è laureato in zoologia all'Università di Londra e ha allestito per la BBC vari programmi naturalistici. Con la moglie Jean e il fratello gestisce un'agenzia fotografica, la Premaphotos Wildlife.

Diffondere un po' di buio

di Ian Stewart

Angela è in piedi in una stanza con pareti perfettamente riflettenti. In qualche punto di questa Casa degli specchi, il suo amico Bruno accende un fiammifero. Indipendentemente dalla forma della stanza o dalla posizione dei due, Angela può sempre guardarsi intorno e vedere il fiammifero di Bruno o la sua riflessione? Detto altrimenti, la luce del fiammifero riempie l'intera stanza, nessun punto escluso e ovunque sia il fiammifero?

Questo problema fu pubblicato per la prima volta nel 1969, nella formulazione di Victor Klee, ma si ritiene che le sue origini risalgano almeno a Ernst Straus, negli anni cinquanta. Lo si trova in diverse varianti. La stanza può essere a due o a tre dimensioni (nel secondo caso, anche il pavimento e il soffitto devono essere specchi). Può avere pareti piane - poligoni in due dimensioni, poliedri in tre dimensioni - oppure curve. In tutte le versioni, la formulazione matematica standard sostituisce con punti l'occhio di Angela e la fiammella di Bruno. Questi punti non possono trovarsi sui bordi della stanza; si assume anche che siano entrambi trasparenti.

Per ogni parete la legge di riflessione è quella consueta: «angolo di incidenza uguale ad angolo di riflessione». Ovunque questi angoli non siano ben definiti - come in uno spigolo o in un vertice - si assume che il raggio di luce venga assorbito e non proceda oltre.

La risposta al problema per stanze poligonali piane è stata pubblicata da George W. Tokarsky nel numero di dicembre 1995 di «American Mathematical Monthly» (vol. 102, n. 10). L'elegante dimostrazione di Tokarsky include un «trucco di riflessione» e, come sempre avviene nella migliore matematica, è sorprendentemente semplice.

L'idea di fondo è quella di iniziare con un triangolo rettangolo isoscele, che indichiamo con *AED* (*si veda l'illustrazione qui sotto*). Questo triangolo può essere «svolto» in un reticolo regolare mediante riflessioni ripetute sui tre lati.

Innanzitutto si usa il reticolo per dimostrare un fatto fondamentale: se si pone un fiammifero in uno degli angoli di 45 gradi della stanza triangolare (indicato con *A*), i raggi di luce da esso prodotti non possono mai ritornare al fiammifero. Per capire il motivo, osserviamo innanzitutto che uno qualsiasi di questi raggi, poniamo *ABCD*, può essere svolto allo stesso modo del triangolo stesso. Per esempio, il segmento *BCD* all'interno del triangolo viene riflesso lungo la parete *ED* e diventa $BC'D$ dall'altra parte della parete. Inoltre, nella riflessione su *EF*, $C'D$ si svolge in $C'D'$. Allora lo svolgimento di *ABCD* dà luogo a $ABC'D'$. Si noti che *ABCD* termina con *D* perché si tratta di un angolo del triangolo; così pure, il punto «svolto» D' si trova su un nodo del reticolo. La legge di riflessione implica che $ABC'D'$ sia una retta, un fatto essenziale per ciò che segue.

Ho colorato i tre vertici in modo che *A* ed *E*, posti negli angoli di 45 gradi, siano rispettivamente nero e bianco, e *D*, nell'angolo di 90 gradi, sia rosso. Anche ciascun punto del reticolo è colorato, con il colore del vertice che vi ricade svolgendo il triangolo. L'ipotesi è che se ci fosse un percorso che da *A* torna ad *A*, questo percorso dovrebbe prima passare per un angolo rosso o bianco, dove il raggio sarebbe assorbito.

Un reticolo generato da un triangolo rettangolo è la chiave per capire le riflessioni all'interno della «stanza degli specchi» *AED*. Un raggio di luce che abbia origine in *A* e rimbalzi nell'interno della stanza può essere «svolto» in una linea retta nel reticolo. Il punto in cui essa termina indica ciò che accade al raggio iniziale.

Per dimostrare questa affermazione, immaginiamo che esista un percorso da *A* ad *A*. Svolgiamo questo percorso, seguendo lo schema dei triangoli svolti; il procedimento garantisce che il raggio svolto sia una linea retta che termina in un punto nero A' del reticolo. Questi punti neri distano tra loro di un numero pari di unità del reticolo in direzione sia orizzontale sia verticale: le loro coordinate sono interi pari. Allora, il punto centrale di AA' ha almeno una delle coordinate dispari, ed è quindi un punto rosso o bianco del reticolo.

Questo ragionamento, però, cade se entrambe le coordinate sono multipli di quattro. Ma allora il punto centrale A'' di AA' ha coordinate pari ed è un punto nero del reticolo: quindi possiamo provare ancora per $A'A''$. I casi sono due: o il punto centrale di quel segmento è un punto rosso o bianco del reticolo, oppure anche A'' ha entrambe le coordinate multiple di quattro. In quest'ultimo caso, possiamo sostituire A'' con il nuovo punto centrale A''', e così via. Dopo un numero finito di queste sostituzioni, dobbiamo infine arrivare a un segmento con una coordinata dispari. Per esempio, se le coordinate di A' sono 48 in orizzontale e 28 in verticale, A'' ha coordinate (24,14) e A''' ha coordinate (12,7). Il punto centrale A''' è quindi un punto rosso o bianco del reticolo.

Dunque ogni percorso svolto che unisca *A* con un punto nero del reticolo deve toccare un punto rosso o bianco del reticolo. Quindi, se avvolgiamo ancora il percorso, concludiamo che il percorso originale tocca l'uno o l'altro dei due angoli prima di tornare ad *A*.

Possiamo costruire stanze poligonali mettendo insieme segmenti orizzontali, verticali o diagonali del reticolo triangolare (*si veda l'illustrazione a fianco*). Supponiamo che un raggio di luce si muova rimbalzando all'interno di una simile stanza, partendo da Bruno e finendo ad Angela (entrambi in un punto nero). Possiamo allora riavvolgere quel raggio per ottenere un percorso all'interno di un singolo triangolo che genera il reticolo. Ma si può stabilire che qualsiasi percorso tra due punti neri toccherà un vertice rosso o bianco; quindi svolgendo di nuovo concludiamo che anche il raggio iniziale deve toccare un punto rosso o bianco. Supponiamo di far sì che valgano queste tre condizioni:

- I punti neri che rappresentano Angela e Bruno sono all'interno della stanza.
- All'interno della stanza non c'è alcun punto rosso o bianco.
- Ogni punto rosso o bianco sul bordo della stanza si trova in un vertice.

Un raggio che colpisca un punto rosso o bianco deve colpire un vertice e venire assorbito: quindi non esiste.

Se provate a progettare una stanza siffatta, vi accorgerete che ci vuole una certa dose di ingegnosità. Per esempio, bisogna aggiungere triangoli per introdurre altre curvature nel bordo; se non si fa attenzione, queste anse possono creare punti aggiuntivi interni al reticolo che violano la seconda condizione.

Questi esempi dimostrano che in una stanza poligonale ci possono essere posizioni in cui un fiammifero non illumina tutti i punti della stanza. Ciò che abbiamo dimostrato, però, è solo che almeno un punto non è illuminato. È possibile che non sia illuminata un'intera regione di area non nulla? Questo problema è notevolmente più arduo. Per quanto ne sappiamo, i raggi che partono da Bruno possono passare a una distanza piccola a piacere da Angela: abbiamo solo dimostrato che non possono colpirla esattamente.

A quanto pare, non si conosce la risposta per stanze poligonali. Ma Roger Penrose, assieme a un collaboratore, dimostrò nel 1958 che, se una stanza ha pareti curve, possono esserci regioni non illuminate. Ricordiamo, per esempio, che un'ellisse ha due punti speciali, i fuochi. Si può dimostrare che qualsiasi raggio di luce che passi per i fuochi e rimbalzi sulla parete curva, attraverserà di nuovo la linea retta che unisce i fuochi prima di colpire nuovamente la curvatura. Tenendo a mente questa proprietà, si può facilmente vedere che una stanza costituita da due metà di un'ellisse (*si veda l'illustrazione in basso*) ha regioni che non possono essere illuminate. In particolare, i raggi che hanno origine nella zona colorata in azzurro (Bruno) non possono entrare in quella rosa (Angela).

Una stanza degli specchi costituita da un reticolo di triangoli rettangoli garantisce che nessun raggio di luce proveniente da Bruno può raggiungere Angela.

Esistono vari problemi analoghi, alcuni risolti, altri no. Se ne può trovare una selezione in *Unsolved Problems in Geometry* di Hallard T. Croft, Kenneth J. Falconer e Richard K. Guy (Springer-Verlag, 1991) e in *Old and New Unsolved Problems in Plane Geometry and Number Theory* di Victor Klee e Stan Wagon (Mathematical Association of America, 1991). Per esempio, Jeffrey B. Rauch dell'Università del Michigan ha dimostrato che in una stanza curva, con un bordo continuo in tutti i punti tranne uno, è necessario un numero infinito di fiammiferi per illuminarla completamente.

Rauch ha dimostrato anche che per qualsiasi numero finito di fiammiferi c'è una stanza a curvatura continua che non può essere illuminata da quel numero di fiammiferi. E Janos Pach del City College di New York ha posto questa elegante domanda: se si accende un fiammifero in una foresta di alberi perfettamente riflettenti, la luce deve essere visibile all'esterno? Considerando gli alberi come circonferenze, il problema potrebbe essere ricondotto a una superficie piana. Nessuno conosce la risposta.

Blocchi quadrati formano un'altra stanza degli specchi che ripara Angela dalla luce di Bruno.

Curve ellittiche disegnano una stanza dove Angela non vede la luce di Bruno.